

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
AERONÁUTICOS**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES
CERÁMICOS AVANZADOS A ALTAS VELOCIDADES DE
DEFORMACIÓN**

TESIS DOCTORAL

FRANCISCO GÁLVEZ DÍAZ-RUBIO

INGENIERO AERONÁUTICO

1999

DEPARTAMENTO DE MOTOPROPULSIÓN Y FLUIDODINÁMICA

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
AERONÁUTICOS**

**CARACTERIZACIÓN MECÁNICA DE MATERIALES
CERÁMICOS AVANZADOS A ALTAS VELOCIDADES DE
DEFORMACIÓN**

**POR
FRANCISCO GÁLVEZ DÍAZ-RUBIO
INGENIERO AERONÁUTICO**

DIRECTORES DE TESIS

**VICENTE SÁNCHEZ GÁLVEZ
DOCTOR INGENIERO DE CAMINOS CANALES Y PUERTOS**

Y

**JESÚS RODRÍGUEZ PÉREZ
DOCTOR EN CIENCIAS FÍSICAS**

1999

TRIBUNAL ENCARGADO DE JUZGAR LA TESIS DOCTORAL

Presidente:

Vocales:

Vocal Secretario:

CALIFICACIÓN:

A mis Padres

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a mis directores de tesis, D. Vicente Sánchez Gálvez y D. Jesús Rodríguez Pérez por su tiempo y dedicación durante todo el desarrollo de la tesis.

A todos y cada uno de los miembros del Departamento de Ciencia de Materiales de la Universidad Politécnica de Madrid, por su colaboración en todo momento. En especial a Antonio Pintor por su ayuda, a Oscar de Benito por su apoyo en las simulaciones numéricas, a Sidney Chocrón y Javier Gómez por su cooperación. A Pedro Poza, Ygnacio Pastor y Luis Caballero por la preparación de las muestras y la microscopía. A Iñaki Arbilla y Jesús Ruíz. A Andrés Valiente y Jaime Planas por sus ideas en el diseño del dispositivo experimental. A los miembros del taller mecánico, Pascual Colás y Tomás Beleña por su estimable ayuda en la fabricación, a Fernando Navarrete por su colaboración. A Jose Miguel Martínez por sus ideas en el diseño electrónico y en la fotografía. A Rosa María Morera y Ana Flores. Y al Profesor Manuel Elices.

A Charlie Anderson, del SouthWest Research Institute de San Antonio por su hospitalidad durante mi estancia en Texas.

A la Fundación Agustín de Bethencourt por su beca de Investigación durante el primer año.

Al Ministerio de Educación y Ciencia por su beca de Formación de Personal Investigador que ha hecho posible la realización de este trabajo.

Y en especial a Marimar.

Resumen.

Debido a la dificultad para determinar la resistencia a tracción de materiales frágiles mediante la realización de ensayos de tracción uniaxial, no existe en la actualidad una técnica definida. En esta Tesis se aporta una nueva técnica experimental, los ensayos de tracción dinámica por “spalling” en barras cilíndricas alargadas. Se ha llevado a cabo un programa de ensayos con probetas instrumentadas y fotografía de alta velocidad. Esta técnica se ha estudiado a fondo y se ha aplicado a diversos materiales cerámicos avanzados como son alúminas de distintos grados de pureza, alúmina reforzada con zirconia, carburo de silicio y carburo de boro. Para determinar la resistencia a tracción en condiciones de carga no uniaxial, se suele recurrir a métodos indirectos como los ensayos de compresión diametral de cilindros (ensayos brasileños). En esta Tesis se aporta un amplio programa experimental con los materiales cerámicos mencionados. La experimentación se ha realizado a bajas velocidades de deformación mediante máquinas servohidráulicas convencionales y a altas velocidades de deformación mediante una barra Hopkinson. Finalmente se presenta una comparación de los valores de resistencia a tracción obtenidos con los distintos tipos de ensayos, mostrando la influencia de la velocidad de deformación en los valores de la resistencia a tracción.

Abstract.

Due to the difficulty to determine the tensile strength of brittle materials using uniaxial tensile tests, no well-defined technique exists. In this Thesis a new experimental approach is defined, the dynamic uniaxial tests by spalling in long rods. A test programme with instrumented specimens and high-speed photography has been carried out. This technique has been well studied, and it has been applied to several materials such as alumina of different purity grades, a composite of alumina and zirconia, silicon carbide and boron carbide. To measure the tensile strength under not uniaxial conditions is usual to utilise indirect methods like the splitting tests (brazilian tests). In this Thesis an experimental work on the ceramic materials mentioned before has been carried out. The tests have been performed both at low strain rates in conventional servo-hydraulic machines and at high strain rates with a Hopkinson bar. In this investigation a comparison of the results of tensile strength using the different kind of tests is presented, showing the influence of the strain rate on the values.

CONTENIDO

| | | |
|----------|---|----------|
| 1 | INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS..... | 1 |
| 1.1 | Introducción..... | 3 |
| 1.2 | Objetivos | 6 |
| 1.3 | Contenido de la Tesis..... | 7 |
| 2 | MATERIALES CERÁMICOS AVANZADOS..... | 9 |
| 2.1 | Estructura y comportamiento mecánico de los materiales cerámicos avanzados..... | 11 |
| 2.1.1 | Introducción | 11 |
| 2.1.2 | Estructura de los materiales cerámicos avanzados..... | 12 |
| 2.1.3 | Propiedades mecánicas..... | 14 |
| 2.1.4 | Aplicaciones..... | 18 |
| 2.2 | Comportamiento balístico de los materiales cerámicos avanzados..... | 20 |
| 2.2.1 | Impacto balístico..... | 20 |
| 2.2.2 | Modelos de comportamiento balístico de los materiales cerámicos | 26 |
| 2.3 | Aspectos microestructurales de la rotura dinámica de materiales cerámicos..... | 35 |
| 2.4 | Técnicas de caracterización dinámica de materiales..... | 39 |
| 2.4.1 | Técnicas de ensayo de materiales cerámicos a velocidades de deformación..... | 41 |
| 2.4.2 | Técnicas de ensayo a velocidades de deformación altas | 47 |

| | | |
|----------|--|-----------|
| 2.4.3 | Técnicas de ensayo a velocidades de deformación muy altas..... | 50 |
| 2.5 | Técnicas de simulación numérica..... | 53 |
| 3 | METODOLOGÍA DE ENSAYOS | 57 |
| 3.1 | Introducción. | 59 |
| 3.2 | Ondas elásticas unidimensionales en sólidos. | 61 |
| 3.3 | La barra Hopkinson | 70 |
| 3.4 | Ensayos de compresión | 77 |
| 3.4.1 | Ensayos estáticos de compresión. | 77 |
| 3.4.2 | Ensayos dinámicos de compresión. | 78 |
| 3.5 | Ensayos de tracción indirecta por compresión diametral. | 81 |
| 3.5.1 | Ensayos estáticos de tracción indirecta por compresión diametral. | 84 |
| 3.5.2 | Ensayos dinámicos de tracción indirecta por compresión diametral..... | 100 |
| 3.6 | Ensayos de tracción directa por "spalling" | 92 |
| 3.6.1 | Principios del ensayo..... | 92 |
| 3.6.2 | Dispositivo experimental. | 95 |
| 3.6.3 | Análisis del proceso..... | 100 |
| 3.6.4 | Procedimiento de cálculo de la resistencia a tracción..... | 116 |
| 3.7 | Excitación por impulsos..... | 121 |
| 3.8 | Fotografía de alta velocidad..... | 123 |
| 3.8.1 | Sistema de adquisición de imágenes..... | 124 |
| 3.8.2 | Sistema de iluminación..... | 126 |

| | | |
|--|--|------------|
| 4 | RESULTADOS EXPERIMENTALES..... | 131 |
| 4.1 | Materiales | 133 |
| 4.2 | Ensayos de tracción indirecta por compresión diametral..... | 140 |
| 4.3 | Ensayos dinámicos de tracción directa por Spalling..... | 146 |
| 4.4 | Ensayos de compresión..... | 149 |
| 4.5 | Influencia de la velocidad de deformación y el tipo de ensayo en la resistencia a tracción..... | 150 |
| 4.6 | Análisis fractográfico..... | 158 |
| 5 | CONCLUSIONES..... | 163 |
| 5.1 | Conclusiones | 165 |
| 5.2 | Trabajo futuro..... | 167 |
| 6 | BIBLIOGRAFÍA..... | 169 |
| | | |
| Apéndice A. ENSAYOS ESTÁTICOS DE TRACCIÓN INDIRECTA POR COMPRESIÓN DIAMETRAL..... | | A1 |
| Apéndice B. ENSAYOS DINÁMICOS DE TRACCIÓN INDIRECTA POR COMPRESIÓN DIAMETRAL..... | | B1 |
| Apéndice C. ENSAYOS DE TRACCIÓN DINÁMICOS DIRECTA POR SPALLING | | C1 |

1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS

1.1 Introducción.

Los materiales cerámicos avanzados aportan un conjunto de propiedades muy interesantes para las aplicaciones en las que los materiales tradicionales no son capaces de satisfacer las exigencias de diseño. Desde el punto de vista estructural ofrecen enormes ventajas, aunque también presentan algunos inconvenientes. A las excelentes relaciones rigidez/peso y resistencia/peso, el buen comportamiento en corrosión y a elevadas temperaturas, se enfrenta la gran sensibilidad a la presencia de defectos que desemboca en una elevada fragilidad limitando su campo de aplicación.

El desarrollo de los materiales cerámicos avanzados fue impulsado en los años sesenta gracias a las aplicaciones balísticas, y en la actualidad el empleo de estos materiales en el diseño de protecciones se considera imprescindible. El empleo no sólo se reduce a protecciones personales tipo chaleco, a blindajes añadidos en vehículos militares o vehículos oficiales de personalidades, sino que su uso se extiende cuando el peso es un factor importante. Tal es el caso de la industria aeronáutica donde los blindajes de cabinas de aviones y de asientos de helicóptero están frecuentemente basados en materiales cerámicos. El empleo de estas protecciones en carcasas de motores ante el posible fallo de un álabe de turbina es también objeto de estudio en la actualidad.

En este tipo de elementos la velocidad de aplicación de las cargas sobre las distintas partes de la estructura es muy elevada, lo que exige determinar el comportamiento del material en estas situaciones. Conocer la respuesta del material a altas velocidades de deformación es fundamental para optimizar cualquier diseño.

La evaluación de la respuesta del material de forma efectiva significa determinar las propiedades fundamentales para poder abordar en general cualquier diseño estructural, y de forma particular el diseño de las protecciones balísticas. Uno de los requerimientos fundamentales de estos diseños es el peso, por lo que la densidad es una de las propiedades básicas a tener en cuenta. Además el comportamiento del material está gobernado por la ecuación constitutiva que proporciona la relación entre la tensión y la deformación para un estado general de carga, y por un criterio de rotura que controle el fallo del material.

Los materiales cerámicos obedecen a una ecuación constitutiva elástica y lineal cuando la temperatura no es muy elevada y cuando las presiones no son muy altas. Los criterios de rotura utilizados habitualmente incluyen la resistencia a compresión y la resistencia a tracción como datos del material. Puesto que en estos materiales la resistencia a compresión suele ser un orden de magnitud superior a la resistencia a tracción, es esta última propiedad la que controla la rotura en la mayoría de las ocasiones. Por tanto, conocer la resistencia a tracción es fundamental para describir el fallo del material.

La determinación de esta propiedad mediante ensayos mecánicos no es una tarea sencilla. La elevada fragilidad característica de los materiales cerámicos complica enormemente la realización de ensayos de tracción directa, por lo que se han desarrollado métodos alternativos para determinar esta propiedad. Uno de los métodos de ensayo más comunes es el ensayo de flexión en tres puntos, que proporciona el conocido módulo de rotura, una magnitud relacionada en cierta forma con la resistencia a tracción. Otro método que se emplea con cierta frecuencia para determinar la resistencia a tracción es el ensayo de compresión diametral o ensayo

brasileño, pero requiere de ciertas hipótesis adicionales sobre el comportamiento del material bajo cargas triaxiales.

La situación es mucho más desalentadora cuando se pretende caracterizar el material en condiciones dinámicas. Es sabido que las propiedades mecánicas varían con la velocidad de aplicación de las cargas, por lo que los valores obtenidos en condiciones estáticas pueden no ser representativos cuando la velocidad de deformación es elevada. En este campo existe una escasez notoria de datos experimentales y la información se reduce a unos pocos resultados de distintos tipos de alúminas, siendo prácticamente inexistente en otros materiales cerámicos. Es más, incluso se carece de una metodología propia de los ensayos a alta velocidad de deformación en estos materiales, por lo que su desarrollo constituye en sí mismo un objetivo de gran interés.

Ante este panorama, el ingeniero encargado del diseño de protecciones balísticas se ve obligado a una elección poco satisfactoria. Por un lado, la utilización de resultados obtenidos en condiciones estáticas ignorando la influencia de la velocidad de deformación no es un procedimiento adecuado. Por otro lado, el empleo de modelos que aún incluyendo el efecto de la velocidad de deformación requieren el uso de parámetros de escasa base física o de difícil medida, puede llevar a resultados erróneos y no es un procedimiento científico correcto.

En esta situación se plantea el desarrollo de la presente Tesis Doctoral, principalmente experimental, que pretende proporcionar métodos de caracterización de materiales cerámicos avanzados a altas velocidades de deformación.

1.2 Objetivos.

En el desarrollo de esta Tesis Doctoral se pretenden alcanzar los siguientes objetivos.

- Diseñar, optimizar y aplicar una nueva técnica experimental que permita determinar la resistencia a tracción de materiales cerámicos avanzados a altas velocidades de deformación bajo estados uniaxiales de carga.
- Realizar un estudio analítico y numérico del método desarrollado para analizar las condiciones de validez del ensayo
- Determinar la resistencia a tracción de distintos materiales cerámicos avanzados, seleccionados entre los de mayor uso en aplicaciones balísticas, mediante el empleo de esta nueva técnica y otras complementarias.
- Analizar la influencia de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos avanzados estudiados.

1.3 Contenido de la Tesis.

La Tesis Doctoral esta organizada en seis capítulos. En éste, el primero, se introduce el tema de trabajo y se plantean los objetivos de la investigación.

En el capítulo segundo se presenta una revisión sobre los materiales cerámicos avanzados, sus propiedades, su comportamiento y sus aplicaciones, haciendo especial mención en el campo de las protecciones balísticas. Se describen los modelos de comportamiento más utilizados y las técnicas de caracterización más usuales profundizando en los métodos dinámicos.

El tercer capítulo está dedicado a la metodología de los ensayos realizados en esta Tesis. En él se introduce una de las aportaciones más originales del trabajo, la nueva técnica de ensayos dinámicos de tracción uniaxial por "spalling", que proporciona una medida de la resistencia a tracción del material a altas velocidades de deformación. Se describe el principio de esta técnica, el equipo experimental diseñado, un análisis de validez de los ensayos y el procedimiento final de obtención de resultados. Se incluyen también en este capítulo la metodología propia de otros tipos de ensayos utilizados en la caracterización de los materiales: los ensayos de compresión, ensayos brasileños y ensayos de excitación por impulsos. También se describe en detalle el sistema de fotografía de alta velocidad empleado para captar imágenes de la rotura de las probetas.

En el capítulo cuarto se presentan los materiales ensayados, tres alúminas de distintos grados de pureza, un compuesto de alúmina con zirconia, carburo de silicio y carburo de boro. Se recogen los resultados de resistencia a tracción obtenidos mediante ensayos brasileños en condiciones estáticas y dinámicas, los resultados obtenidos mediante la técnica de tracción directa

por "spalling", así como los resultados de los ensayos de compresión. Se analiza la influencia de la velocidad de deformación y el tipo de ensayo para los distintos materiales.

Las conclusiones del trabajo de investigación realizado y las posibles líneas de trabajo futuro consecuencia de los resultados obtenidos se exponen en el capítulo quinto.

En el sexto y último capítulo se recoge la bibliografía más relevante relacionada con el tema tratado.

Finalmente, todos los ensayos realizados que permitieron determinar la resistencia a tracción se presentan en tres apéndices, clasificados por el tipo de ensayo. El primer apéndice recoge los resultados de los ensayos brasileños en condiciones estáticas, el segundo el mismo ensayo en condiciones dinámicas, y el tercero los resultados obtenidos mediante la técnica de ensayo original de esta Tesis, los ensayos de tracción directa por "spalling".

2 MATERIALES CERÁMICOS

AVANZADOS

2.1 Estructura y comportamiento mecánico de los materiales cerámicos avanzados.

2.1.1 Introducción

En primera aproximación puede decirse que los materiales cerámicos son aquellos materiales químicamente definidos como inorgánicos y no metálicos, sin embargo, esta definición engloba a las rocas y a muchos minerales que se encuentran en la naturaleza que no son considerados como cerámicos (Freiman 1991). En general, se consideran únicamente como materiales cerámicos aquellos que han sido producidos por el hombre de forma artificial.

Etimológicamente, cerámica es un término que viene del griego *keramos*, cuyo significado puede traducirse como *hacer alfarería*. El término cerámica se utilizaba en el pasado para referirse al arte de producir artículos mediante la técnica de la alfarería. Las cerámicas tradicionales son materiales dedicados en general a la construcción (arcillas, cemento, gres...) y a usos aplicados en el hogar y la industria (loza, porcelana...). En la actualidad se incluye dentro de los materiales cerámicos a los óxidos, carburos, nitruros, boruros, y compuestos de ellos.

Mientras que las cerámicas tradicionales tienen más de 3000 años de antigüedad, la existencia de los materiales cerámicos avanzados es mucho más reciente, sin que en muchos casos supere los 30 años. El término avanzado que se añade al de cerámica, se refiere a una nueva generación de materiales cerámicos en los que se ha logrado una mejora sustancial en alguna de sus propiedades: ópticas, magnéticas, electrónicas o mecánicas (Cranmer 1991). Las cerámicas avanzadas se han desarrollado, modificando

mediante nuevas técnicas de producción, alguno de los diferentes niveles de la estructura del material, desde el nivel atómico y la microestructura hasta la forma definitiva del componente.

Uno de los usos que más auge está experimentando es el empleo de materiales cerámicos como componentes estructurales. Las cerámicas estructurales son aquellas en las que la mejora de las propiedades se ha centrado en los aspectos mecánicos. Estos usos requieren materiales con alta resistencia en diversas condiciones ambientales, capaces de soportar elevadas temperaturas y resistentes a la corrosión y oxidación (Cranmer 1991). Los materiales cerámicos ofrecen una sustancial rebaja en el peso frente a otros materiales como los metales y cubren un amplio espectro de usos tan dispares como componentes de vehículos espaciales o implantes dentales (Ferber 1991). Entre las aplicaciones que en mayor grado han motivado el desarrollo de nuevos materiales cerámicos cabe destacar su empleo en el diseño de protecciones frente a impacto balístico (Zukas 1982). Así se han desarrollado y perfeccionado alúminas de distintos grados de pureza, carburo de silicio, carburo de boro, diboruro de titanio y nitruro de aluminio entre otros. Es precisamente, esta clase de materiales cerámicos el objeto de estudio de la presente tesis doctoral.

2.1.2 Estructura de los materiales cerámicos avanzados

Los materiales cerámicos suelen estar compuestos por al menos dos elementos unidos formando óxidos, carburos, nitruros o boruros, mediante enlaces iónicos o covalentes, dependiendo del tipo de cerámico (Hare 1984).

Por otra parte, suelen formar microestructuras cristalinas en los que cada grano es un cristal aproximadamente perfecto, pero con una estructura

mucho más complicada que en los metales. La estructura cristalina de cada grano, orientados de forma diferente, puede producir un incremento de resistencia a la propagación de defectos a través del material (Freiman 1991).

La forma más usual en la que se fabrican estos materiales es en forma monolítica, aunque también se encuentran en forma de compuestos de dos o más componentes. El procesado de estos cerámicos se puede hacer de múltiples formas (Lehman 1991), partiendo de polvos, a veces añadiendo alguna pequeña cantidad de un ligante, y finalmente comprimiéndolos casi siempre a altas temperaturas. Con un buen procesado se llega a obtener una porosidad prácticamente nula. La pureza de los materiales puede llegar a ser muy elevada, encontrándose por ejemplo alúminas desde el 85% al 99.9%. En cuanto a los materiales compuestos, algunas de las cerámicas más empleadas son carburo de silicio y alúmina, o alúmina con zirconia.

Los materiales cerámicos tienen usualmente tras el proceso de fabricación una microestructura fina consistente en pequeños granos cristalinos de unas pocas micras de tamaño. En la Tabla 2.1 se muestra el tamaño de grano típico de algunos materiales cerámicos. Durante el procesado, los pequeños granos no se orientan en ninguna dirección predeterminada, sino de una forma aleatoria. Esta distribución al azar hace que a escala macroscópica, las propiedades mecánicas que presentan sean isotrópicas. El proceso de compactación y prensado de polvos puede dar lugar a cierta porosidad en el producto final. Maximizar las propiedades mecánicas implica reducir la porosidad al mínimo, pues los poros son pequeños defectos que pueden actuar como concentradores de tensión e iniciadores del fallo prematuro del material (Greenhut 1991). No obstante, la porosidad global de estos materiales suele ser casi nula y en consecuencia la densidad aparente es prácticamente igual a su densidad teórica (Shields 1991). Sin embargo, no

debe olvidarse que la existencia de un pequeño defecto aislado puede resultar fundamental en el comportamiento final.

Tabla 2.1. Tamaño de grano típico y estructura cristalina de algunos materiales cerámicos.

| <i>Material</i> | <i>Tamaño de grano (nm)</i> | <i>Estructura Cristalina</i> |
|-----------------|-----------------------------|------------------------------|
| Al_2O_3 | 2-50 | Hexagonal |
| SiC a SiC b | 1-50 | Hexagonal Cúbico |
| B_4C | 5-20 | Romboidal |

2.1.3 Propiedades mecánicas

El comportamiento de estos materiales a temperatura ambiente es prácticamente elástico y lineal hasta su rotura, presentando una gran rigidez con un módulo de elasticidad alto (Hare 1984), que llega a duplicar en algunos casos al del acero. Sin embargo, a medida que la temperatura aumenta pueden aparecer deformaciones plásticas considerables, y el módulo de elasticidad presenta una cierta dependencia con la temperatura (Hare 1984). En los materiales cerámicos el módulo de elasticidad no depende significativamente de la velocidad de deformación. La relación entre la deformación transversal y longitudinal, dada por el coeficiente de Poisson es baja, sobre todo en los carburos y menor aún en los boruros. En la

Figura 2.1 se muestran los valores del coeficiente de Poisson y el módulo de elasticidad para algunas cerámicas.

Las resistencias a compresión y tracción uniaxiales son las propiedades que normalmente se utilizan para caracterizar la resistencia mecánica del material. Los materiales cerámicos tienen, en general, una elevada resistencia a compresión uniaxial por lo que se utilizan principalmente bajo cargas de compresión. Este comportamiento es consecuencia de la dificultad de movimiento de las dislocaciones por las estructuras cerámicas, incluso a elevadas temperaturas (Hare 1984). La Tabla 2.2 recoge el valor de la resistencia a compresión de algunos de los materiales cerámicos más conocidos.

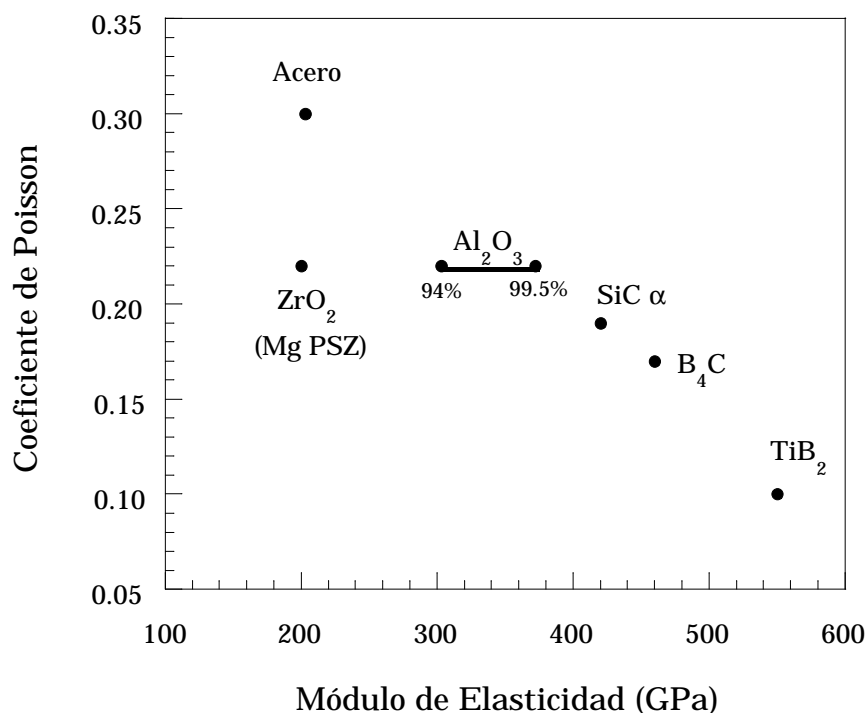


Figura 2.1. Módulo de elasticidad y coeficiente de Poisson para algunas cerámicas.

La determinación de la resistencia a compresión de un material cerámico es una tarea complicada al ser necesarios elementos que transmitan la carga de mayor resistencia que las probetas a ensayar y un sistema experimental que asegure que el estado tensional es de compresión simple (Adams 1976, Tracy 1987). Si a estas dificultades se añade la velocidad de deformación como variable adicional, no es de extrañar la escasez de datos sobre la resistencia a compresión de materiales cerámicos a altas velocidades de deformación. Los datos de Lankford (1977 y 1981) son probablemente uno de los pocos estudios con garantías.

La limitación principal de los materiales cerámicos en aplicaciones estructurales es su fragilidad, consecuencia de la escasa capacidad de los materiales cerámicos para deformarse plásticamente y para soportar cargas cuando existen defectos en el interior del material (Quinn 1991). Esta característica se refleja en una baja tenacidad de fractura y en una marcada diferencia entre la resistencia a tracción y la resistencia a compresión. Como puede apreciarse en la Tabla 2.2 esta última es casi un orden de magnitud superior a la resistencia a tracción.

Es evidente que la resistencia a tracción es una propiedad clave en la caracterización mecánica de un material cerámico. Los artículos y trabajos de investigación centrados en los métodos de ensayo de tracción han sido numerosos (Quinn 1990, Ovri 1987) y algunos de ellos han abordado los ensayos a alta velocidad de deformación (Rodríguez 1994).

No existe un consenso general sobre la influencia de la velocidad de deformación en la resistencia a tracción, ni siquiera sobre el método de ensayo más apropiado. En esta situación se ha desarrollado esta tesis doctoral, centrada precisamente en la determinación de la resistencia a tracción a altas velocidades de deformación.

Tabla 2.2. Resistencias a compresión y a tracción de diferentes cerámicas. Datos de Engineered Materials Handbook, 1991.

| <i>Material</i> | <i>Resistencia a compresión (MPa)</i> | <i>Resistencia a tracción (MPa)</i> |
|--|---|---|
| <i>Al₂O₃ 85%</i> | <i>1930</i> | <i>155</i> |
| <i>Al₂O₃ 90%</i> | <i>2480</i> | <i>220</i> |
| <i>Al₂O₃ 94%</i> | <i>2103</i> | <i>193</i> |
| <i>Al₂O₃ 96%</i> | <i>2067</i> | <i>193</i> |
| <i>Al₂O₃ 99.5%</i> | <i>2618</i> | <i>262</i> |
| <i>Al₂O₃ 99.9%</i> | <i>3790</i> | <i>310</i> |
| <i>ZrO₂ (Mg-PSZ)</i> | <i>1758</i> | <i>352</i> |
| <i>SiC a</i> | <i>2500</i> | <i>307</i> |
| <i>B₄C</i> | <i>2855</i> | <i>155 (a 980°)</i> |
| <i>TiB₂</i> | <i>5700</i> | <i>300 - 400</i> |

2.1.4 Aplicaciones

Dejando aparte las aplicaciones electrónicas, ópticas y magnéticas, los materiales cerámicos avanzados de aplicación estructural han sufrido un incremento notable en su empleo debido al conjunto de sus propiedades. El uso no sólo se extiende a reemplazar a los materiales tradicionales, sino que ha abierto nuevos horizontes y extendido el uso a aquellas áreas donde los materiales no podían satisfacer hasta ahora las necesidades de diseño. La alta resistencia, el buen comportamiento a desgaste y la estabilidad dimensional hacen de las cerámicas avanzadas unos materiales muy interesantes para un elevado número de aplicaciones ingenieriles (Ferber 1991). Sin embargo, muchas de las posibles aplicaciones están aún sin explotar, especialmente si se logra mejorar en la fragilidad de los materiales cerámicos.

El uso de los materiales cerámicos está extendido en muchas áreas de la industria. El empleo de cerámicos en herramientas de corte es muy común (Adams 1991), consiguiendo resultados que hoy en día hacen impensable el prescindir de ellos. Los materiales cerámicos presentan unas propiedades excelentes en desgaste (Sibold 1991), por lo que su empleo en aplicaciones tribológicas es extenso. También se ha extendido el uso durante los últimos años en intercambiadores de calor (Richlen 1991), debido a la gran estabilidad térmica y la buena resistencia a corrosión de estos materiales. La aplicación en la industria de la automoción está aún en fase de desarrollo (Kamo 1991), y se está considerando el empleo en motores de combustión interna y turbinas de gas, ya que estos materiales presentan ventajas en cuanto su coeficiente de dilatación, fricción, reducción de las fuerzas de inercia y menor peso. En ellos ya son realidad algunos componentes, como válvulas y elementos de compresores. Las aplicaciones en turbinas de gas

(Smyth 1991) incluyen componentes fijos, como cámaras de combustión, y móviles, como álabes de rotores. En la industria aeroespacial el empleo de estos materiales comenzó como recubrimientos para aislamiento térmico y en la actualidad se está desarrollando el uso en componentes de propulsión, de aviones y de cohetes, vehículos espaciales y estructuras espaciales (Levine 1991). En las aplicaciones médicas la ventaja que aportan es la mejor bio-compatibilidad de estos materiales frente a los tradicionales (Hench 1991), encontrando usos como prótesis óseas, dentales y válvulas.

Uno de los campos más beneficiados por la introducción de los materiales cerámicos es el área de las protecciones balísticas. Las ventajas aportadas por estos materiales son muchas, basadas en su gran dureza, su elevada resistencia, su alto módulo elástico y su baja densidad (Zukas 1982). Su empleo como elemento de protección suele ser en forma de placas, sostenidas por una base dúctil que puede ser de aluminio o material compuesto. El peso es uno de los factores fundamentales en el diseño de este tipo de protecciones, siendo la densidad areal o el peso por unidad de superficie crucial en el diseño de un panel de blindaje. Las cerámicas consiguen rebajar considerablemente este factor, ya que sus propiedades específicas son excelentes y la eficiencia balística se ve fuertemente favorecida por ello (Navarro 1993b).

2.2 Comportamiento balístico de los materiales cerámicos avanzados.

2.2.1 Impacto balístico.

Según Zukas (1982), se entiende por impacto balístico la colisión entre un proyectil y un blanco a una velocidad tal que deben considerarse efectos inerciales y la propagación de ondas de tensión en el material. Se trata de un proceso en el que no existe una situación de equilibrio y, en consecuencia, distintas zonas de la estructura impactada pueden estar sometidas a estados tensionales muy diferentes. La velocidad de deformación es varios ordenes de magnitud superior a la correspondiente a situaciones estáticas y debe considerarse la influencia de esta magnitud en las propiedades del material.

Las variables que caracterizan la respuesta de una estructura ante una carga impulsiva dependen muy acusadamente de la velocidad de impacto. Como norma general puede decirse que a medida que aumenta la velocidad de impacto el comportamiento de la estructura se hace secundario frente al comportamiento del material (Viechnicki 1991). Así a velocidades de impacto relativamente bajas la geometría y rigidez de la estructura pueden resultar dominantes. Cuando la velocidad de impacto supera los 300 m/s las propiedades mecánicas del material, límite elástico, resistencia a compresión, resistencia a tracción, controlan la respuesta del sólido. Si el impacto es a velocidades muy elevadas, mayores de 3000 m/s, estamos en el régimen que se conoce como hipervelocidad. En este régimen, el material se comporta como un fluido sometido a presiones enormes, siendo necesaria una ecuación de estado para caracterizar su comportamiento.

En el siglo XX, la cronología de los materiales cerámicos empleados como elementos de protección ante amenazas de tipo balístico puede dividirse en tres etapas diferenciadas (Viecnicky 1991). La primera etapa cubre las dos guerras mundiales, la segunda desde la guerra de Corea hasta la de Vietnam, y la tercera desde entonces hasta nuestros días. Los alemanes fueron los primeros en utilizar elementos cerámicos en la Primera Guerra Mundial al aplicar recubrimientos esmaltados en sus tanques, proporcionándoles así protección ante pequeñas amenazas. Durante la Segunda Guerra Mundial se ensayaron y patentaron diferentes blindajes no metálicos para proteger vehículos ligeros y aeronaves ante armas de pequeño calibre. Aunque en esta primera etapa se comenzaron a utilizar materiales no metálicos, el desarrollo de blindajes basados en materiales cerámicos avanzados no llega hasta la guerra de Corea donde se utilizaron ya elementos defensivos de núcleo de silicio en protecciones de tanques para detener proyectiles de energía cinética a velocidades de unos cientos de metros por segundo. La guerra de Vietnam supuso un gran avance en este terreno por la necesidad por parte americana de proteger los helicópteros, y en particular sus partes vitales como piloto y rotor, ante amenazas de bajo calibre. Los requerimientos exigían un peso muy bajo que no limitara la operatividad de estas aeronaves, lo cual era imposible de conseguir con materiales metálicos. Desde el punto de vista científico, los estudios de Wilkins aportaron un gran avance a finales de la década de los 60. En la actualidad, el desarrollo de nuevos materiales cerámicos ha abierto un nuevo horizonte de ligereza y eficacia junto con una reducción de costes. Su uso no se reduce sólo al campo militar, sino que se ha extendido a la vida civil como en las protecciones personales de tipo chaleco que utilizan las fuerzas de seguridad, en blindajes de vehículos oficiales de personalidades y en motores giratorios ante posibles fallos, como en algunas turbinas de aviación.

Los materiales cerámicos tienen una densidad menor y una eficiencia balística mayor que los materiales tradicionalmente empleados en el diseño de blindajes como el acero y el aluminio de alta resistencia (Anderson 1992). Su relativa fragilidad no permite aún utilizarlos como elementos estructurales, sino que se emplean como elementos añadidos, pero permitiendo una reducción sustancial de la estructura y proporcionando una gran versatilidad para poder adaptarlos a diferentes situaciones.

No es posible definir una conducta general de fallo en el proceso de impacto, debido a los numerosos factores que intervienen como la diversa geometría de los proyectiles, la gran cantidad de materiales empleados en el diseño de blancos y el amplio abanico de velocidades posibles. Sin embargo, si puede establecerse una clasificación en función de los tipos de fallo que aparecen durante el impacto. Como se muestra en la Figura 2.2, obtenida de Zukas (1982), en un material frágil como las cerámicas, destacan tres modos de fallo característicos: fractura frágil, fractura radial y fragmentación. En un impacto real es normal que el material presente una combinación de estos tres modos de fallo. En todos ellos la nucleación de microgrietas y su posterior coalescencia y propagación es el mecanismo físico responsable del daño del material. Parece, por tanto, que las propiedades relacionadas con la iniciación y propagación de grietas son las que van a tener una mayor influencia en la eficiencia balística.

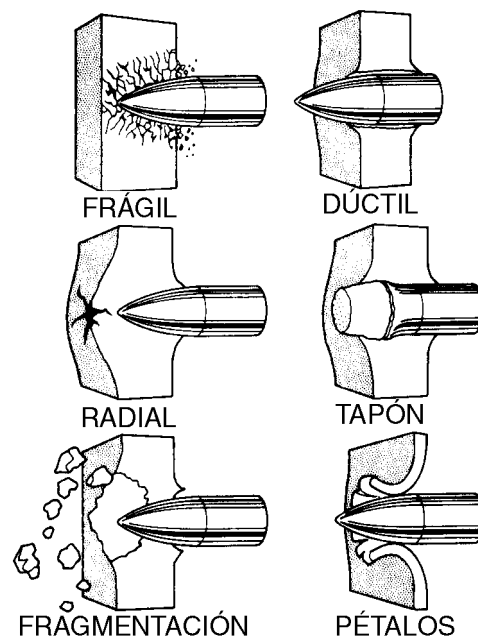


Figura 2.2. Modos de fallo producidos al impactar placas mediante proyectiles. Adaptada de Zukas, 1982.

Según Viechnichi (1991), el comportamiento de los materiales cerámicos ante impacto se puede dividir en tres regímenes de velocidad distintos: impactos a baja velocidad, cuando la velocidad de impacto es menor de 700 m/s; intermedio, cuando el impacto se produce entre 700 y 3000 m/s; e hipervelocidad, si la velocidad de impacto supera los 3 km/s. A velocidades bajas e intermedias el proceso de penetración está gobernado por las propiedades mecánicas del material. En régimen de hipervelocidad los materiales se comportan como fluidos y exhiben un comportamiento hidrodinámico durante el proceso de penetración. Estos tres regímenes de velocidad se representan en la Figura 2.3.

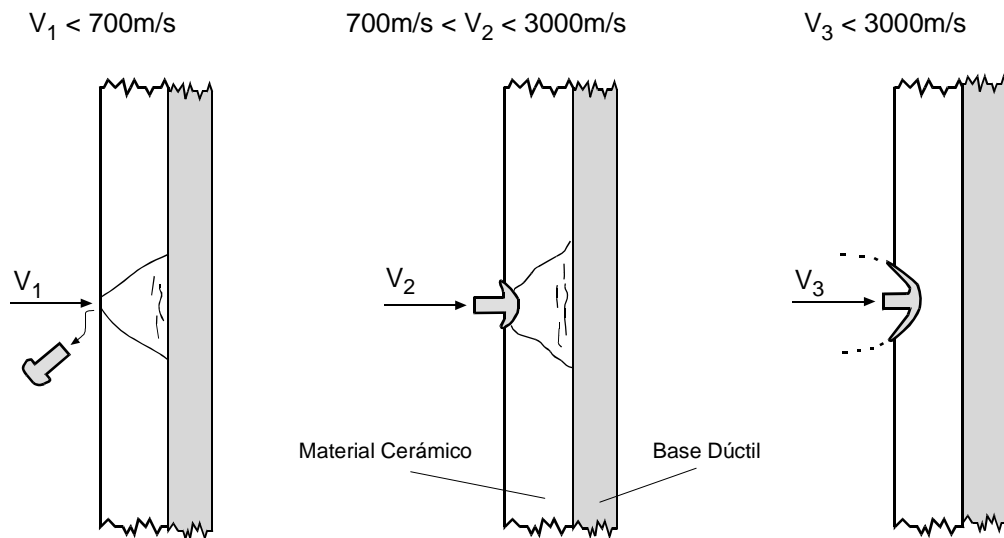


Figura 2.3. Formas de rotura de cerámicas en función de la velocidad de impacto.

La mayoría de las aplicaciones balísticas se sitúan en estos momentos en el régimen intermedio, donde las velocidades de deformación del material rondan los 10^5 a 10^6 s^{-1} . La configuración del blanco suele ser la de un material cerámico soportado por una placa dúctil (Navarro 1993a). La misión de esta placa es la de contener los fragmentos del material cerámico de forma que el proyectil siga erosionándose con ellos.

El proceso de impacto de un proyectil metálico sobre un blanco cerámico ha sido descrito por muchos autores como Zukas (1982 y 1990) o Viechnicki (1991) en los siguientes términos: en un primer momento, se produce una plastificación del proyectil y un daño por compresión en la cerámica en la zona de contacto; a continuación la cerámica rompe por tracción en su cara posterior y se forma un cono cerámico; la etapa final es la erosión del penetrador y la extensión de la rotura de la cerámica a toda la zona cónica.

Del análisis de las etapas del proceso varios autores como Mescall (1986), Zukas (1990) o den Reijer (1991) extrajeron las siguientes observaciones: Las cerámicas, que son más resistentes a compresión que los proyectiles, producen en la primera etapa una plastificación del penetrador y su rotura; la formación del cono, gobernada por la resistencia a tracción del material, permite que la fuerza del impacto se distribuya sobre un área mayor, la base del cono; una vez fracturado todo el material del cono, las propiedades abrasivas de la cerámica erosionan el proyectil, de forma más eficaz cuanto mayor sea la dureza del blanco. Por consiguiente, puede afirmarse que la resistencia a compresión, la resistencia a tracción y la dureza son las propiedades más influyentes en la eficiencia balística de una cerámica. La tenacidad de fractura, si se conoce el tamaño de los defectos presentes en el material, puede ser utilizada en sustitución de la resistencia a tracción como propiedad para el diseño. No debe olvidarse que estas son las propiedades que condicionan la rotura de la cerámica. Su utilización como material de blindaje es consecuencia también de su elevado módulo de elasticidad y su relativa baja densidad.

Para finalizar este apartado del impacto balístico es conveniente recordar que se trata de una situación altamente compleja, con implicaciones termodinámicas, estados tensionales indudablemente tridimensionales y velocidades de deformación elevadas. La caracterización de los materiales involucrados en estos procesos ha de hacerse en condiciones lo más cercanas posible a las de servicio si se quiere tener un mínimo éxito en la modelización de estos fenómenos.

2.2.2 Modelos de comportamiento balístico de los materiales cerámicos

El diseño óptimo de un blindaje frente a una amenaza concreta puede llevarse a cabo utilizando métodos empíricos, analíticos o numéricos. Los métodos empíricos, basados exclusivamente en la realización de pruebas de fuego, son caros, dado el elevado número de variables que es necesario examinar y raramente se utilizan en ámbitos científicos pues sólo son aplicables para el caso particular para el que se han diseñado.

Los modelos analíticos son sencillos y rápidos, aunque su grado de fiabilidad suele ser inversamente proporcional a su grado de complejidad. En la actualidad existen varios modelos para simular el impacto sobre blancos metálicos (Ravid 1982, Walker 1995), de cerámica/metal (Woodward 1990, den Reijer 1991, Walker 1996 y Zaera 1998), o para simular analíticamente el impacto de un proyectil sobre un blindaje cerámica/compuesto (Chocrón, 1998). Todos ellos requieren conocer ciertas propiedades de los materiales que no siempre es posible determinar mediante técnicas de ensayo establecidas. Respecto a los materiales cerámicos, los modelos analíticos suelen suponer que su rotura comienza cuando aparecen cargas de tracción sin especificar claramente su valor. Plantean un equilibrio de fuerzas basado en la resistencia a compresión, que toma valores diferentes para la cerámica intacta y la fracturada. Se suele tomar el Hugoniot o límite elástico en deformación uniaxial (HEL) para la resistencia a compresión de la cerámica intacta, y una fracción de ésta para la cerámica fracturada.

Finalmente, los métodos numéricos se basan en la utilización de hidrocódigos, es decir, programas de elementos finitos o de diferencias finitas para la simulación del proceso completo de penetración del proyectil en un blanco. Los métodos numéricos proporcionan una gran cantidad de

información sobre el proceso. Con el espectacular avance de los ordenadores en su capacidad y potencia de cálculo, resultan relativamente rápidos y sencillos de utilizar con un coste cada día menor. En el caso de blindajes metálicos han demostrado sobradamente su eficacia (Zukas 1990) y hoy en día son insustituibles. En el caso de blindajes que incluyan materiales cerámicos, los programas de cálculo necesitan conocer las ecuaciones constitutivas del material antes y después de la rotura, así como disponer de criterios de rotura fiables. La escasez de muchos de los datos necesarios, a veces propiedades básicas de los materiales, obliga a utilizar valores que se ajustan en el cálculo en función de resultados experimentales. Esto hace que se reduzca drásticamente el rigor científico y la confianza en la capacidad predictiva de dichos cálculos. A la vista de esta situación, los esfuerzos investigadores deberían dirigirse en dos direcciones: en un primer lugar, postular ecuaciones constitutivas y criterios de rotura que puedan escribirse en términos de propiedades medibles experimentalmente; en segundo lugar, desarrollar métodos experimentales cada vez más precisos que posibiliten la determinación mediante ensayos de laboratorio de las propiedades mecánicas del material a altas velocidades de deformación

Debe entenderse con claridad que para caracterizar completamente un material ha de conocerse su ecuación constitutiva, es decir, la relación que liga el tensor de tensiones con el tensor de deformaciones, un criterio de rotura para predecir el fallo del material y una ley que rijan el comportamiento a partir de la rotura. Todo ello, para solicitaciones triaxiales y contemplando la influencia de la temperatura y la velocidad de deformación. En general, puede decirse que para materiales cerámicos funciona relativamente bien un modelo elástico y lineal hasta rotura cuando la temperatura y la presión hidrostática no son excesivamente elevadas.

En cuanto a los modelos de fallo, según Rosenberg (1994) muchos autores coinciden en que no existe un modelo de fallo capaz de predecir correctamente el comportamiento de un material cerámico sometido a un estado de tensiones triaxial. No obstante existen numerosos criterios de rotura para materiales cerámicos más o menos sencillos que proporcionan resultados aproximados al comportamiento real en determinadas situaciones o ensayos concretos. La clasificación más usual de estos criterios de rotura es la descrita por Rajendran (1988), y posteriormente adaptada y explicada por Sánchez Gálvez (1997):

- 1) **Modelos instantáneos**, en los que el fallo ocurre de una forma instantánea cuando alguna de las variables del proceso alcanza un valor crítico. Pueden tratarse de la tensión, la deformación, la energía o alguna otra, incluso cualquier combinación de ellas. Los cálculos de Wilkins (1969 y 1971) se hicieron con este tipo de modelos suponiendo que la rotura se producía al alcanzar la tensión de tracción un valor crítico.
- 2) **Modelos plásticos**. Están inspirados en los criterios de plastificación característicos de los metales. En ellos se transforma el criterio de plasticidad en un criterio de rotura, que puede ser del tipo Mohr-Coulomb, Tresca, Von Mises, Drucker-Prager u otro. Estos modelos pueden incluir dependencia con la presión, temperatura o velocidad de deformación. En algunos casos el modelo incorpora una ley de crecimiento de daño que regula el comportamiento hasta la rotura final. A este tipo pertenecen los modelos de Steinberg (1990), Cortés (1992) y Johnson-Holmquist (1992, 1993).
- 3) **Modelos de nucleación y crecimiento de grietas**. En ellos se supone que el material tiene una distribución aleatoria de defectos (inclusiones, huecos, bordes de grano...) que son el lugar donde se origina el fallo del

material. En ellos la nucleación y velocidad de crecimiento se definen mediante parámetros que son ajustados mediante ensayos. A este grupo pertenece el modelo de Curran (1993).

- 4) **Modelos basados en mecánica de fractura.** Son modelos que consideran la concentración de tensiones en los bordes de fisuras o el balance energético del proceso de fractura. Usan criterios similares al de Griffith aplicados a materiales frágiles. A este tipo pertenecen los criterios de Margolin (1984) y Rajendran (1994 y 1996).

En esta tesis no se pretende realizar un exhaustivo análisis de los modelos de fallo de materiales cerámicos, sino presentar los que más se utilizan. Por ello a continuación se describen algunos de los criterios de fallo más utilizados en la actualidad en los problemas de impacto balístico.

2.2.2.1 Modelo de Cortés

El modelo de Cortés (Cortés 1992) es un modelo elastoplástico con inclusión de un parámetro de daño dependiente del tiempo. La evolución de este parámetro ϕ está gobernada por una ley que sigue la siguiente expresión:

$$(2-1) \quad \phi = \phi_0 (s - s_0) \quad \text{para } s > s_0$$

$$(2-2) \quad \phi = 0 \quad \text{para } s \leq s_0$$

Donde s es la presión hidrostática, ϕ_0 es un parámetro empírico y s_0 es la presión umbral para el inicio del daño. En consecuencia, en cualquier instante una fracción del material, ϕ , se considera dañada mientras que otra, $(1-\phi)$, permanece intacta. El material se encontrará totalmente dañado cuando $\phi=1$.

El límite elástico del material sigue una ley del tipo:

$$(2-3) \quad t = (1-\beta)t_i + \beta t_c$$

donde t_i es el límite elástico de la cerámica intacta y t_c el de la cerámica fracturada. Si la cerámica está fracturada se supone que no endurece por deformación, pero su límite elástico es función de la presión hidrostática:

$$(2-4) \quad t_c = m s$$

donde m es el coeficiente de rozamiento interno del material. La cerámica intacta se supone que responde a un criterio de plastificación de tipo Drucker-Prager:

$$(2-5) \quad t_i = a + b s$$

El modelo de Cortés se ha implementado en códigos de diferencias finitas para simular el impacto de proyectiles de energía cinética sobre blancos de cerámica y aluminio obteniendo un buen acuerdo con los resultados experimentales. Sin embargo, su capacidad predictiva no está demostrada cuando se extiende a situaciones diferentes. Además los parámetros del modelo (s_0 , β_0 , m ...) son muy difíciles de relacionar con propiedades medibles.

2.2.2.2 Modelo de Johnson-Holmquist.

Este modelo, desarrollado conjuntamente por G.R.Johnson y T.J.Holmquist, es un modelo de fallo basado en el límite elástico de materiales frágiles como los cerámicos. Este modelo tiene dos versiones, la primera denominada JH-1 (Johnson, 1992) y una versión mejorada de la anterior denominada JH-2 (Johnson 1993). La resistencia depende de la presión, la rotura sigue un

modelo de daño, el material presenta una cierta resistencia después de la rotura e incluye el efecto de la velocidad de deformación. Las características del modelo JH-2, se representan en la Figura 2.4 y se comentan a continuación.

El modelo se plantea en términos de la tensión equivalente y la presión hidrostática normalizada por los valores respectivos en el límite elástico en deformación uniaxial o Hugoniot (s_{HEL} , P_{HEL}). También la velocidad de deformación se escribe adimensionalizada por una velocidad de referencia $\dot{\epsilon}_0$ que suele tomarse igual a 1 s^{-1} para simplificar las expresiones.

El material obedece a una ley elastico-lineal hasta que la tensión equivalente normalizada, $s^* = s/s_{HEL}$, alcanza la condición:

$$(2-6) \quad s_i^* = A(P^* + T^*)^n \left(1 + C \ln \dot{\epsilon}^* \right)$$

donde A , C , y n son constantes del material; $P^* = P/P_{HEL}$, $T^* = T/P_{HEL}$ siendo T la máxima presión hidrostática de tracción que el material puede soportar y $\dot{\epsilon}^* = \dot{\epsilon}/\dot{\epsilon}_0$.

A partir de este momento el material empieza a dañarse de acuerdo con la siguiente expresión:

$$(2-7) \quad D = \frac{\Delta e_p}{e_p^f}$$

donde D es el parámetro que mide el daño, Δe_p la deformación "plástica" acumulada en cada ciclo de integración y e_p^f la deformación "plástica" máxima dada por:

$$(2-8) \quad \mathbf{e}_P^f = D_1 (P^* + T^*)^{D_2}$$

donde D_1 y D_2 son constantes del material.

La respuesta global del material es debida al comportamiento de la cerámica intacta y la cerámica dañada según:

$$(2-9) \quad \mathbf{s}^* = \mathbf{s}_i^* - D(\mathbf{s}_i^* - \mathbf{s}_f^*)$$

la tensión equivalente normalizada de la cerámica dañada es igual a:

$$(2-10) \quad \mathbf{s}_f^* = B(P^*)^m \left(1 + C \ln \dot{\mathbf{e}}^* \right)$$

donde B y m son nuevas constantes, características ahora del material dañado. El valor de esta magnitud se acota de manera que $\mathbf{s}_f^* \leq SFMAX$.

A medida que se va produciendo daño en el material, la deformación volumétrica crece y se produce un aumento de presión DP que varía entre cero para $D=0$ (material intacto) y un valor máximo DP_{MAX} cuando $D=1$ (material completamente fracturado). El valor de este incremento de presión debido al daño se calcula por consideraciones energéticas. La Figura 2.4 explica el proceso de daño y fractura de un material del tipo de Johnson-Holmquist sometido a un proceso de deformación a presión y velocidad de deformación constantes.

Las constantes del modelo A , B , C , n , m , $SFMAX$, D_1 y D_2 se han determinado en vidrio (Holmquist, 1995) mediante ensayos cuasiestáticos de compresión uniaxial, ensayos dinámicos de compresión uniaxial mediante

barra Hopkinson, ensayos cuasiestáticos biaxiales (ensayos brasileños) y ensayos de impacto de placas. También se han obtenido para Al_2O_3 de 99.5% de pureza usando técnicas de ensayo similares, aunque algunos parámetros fueron estimados debido a la carencia de resultados experimentales en este material (Anderson 1995). También se han obtenido en programas militares las constantes de este modelo para otros materiales, pero por su carácter estratégico se encuentran clasificados y no se han publicado. Por tanto es necesario un programa experimental de ensayos que permita obtener estos parámetros para diferentes materiales.

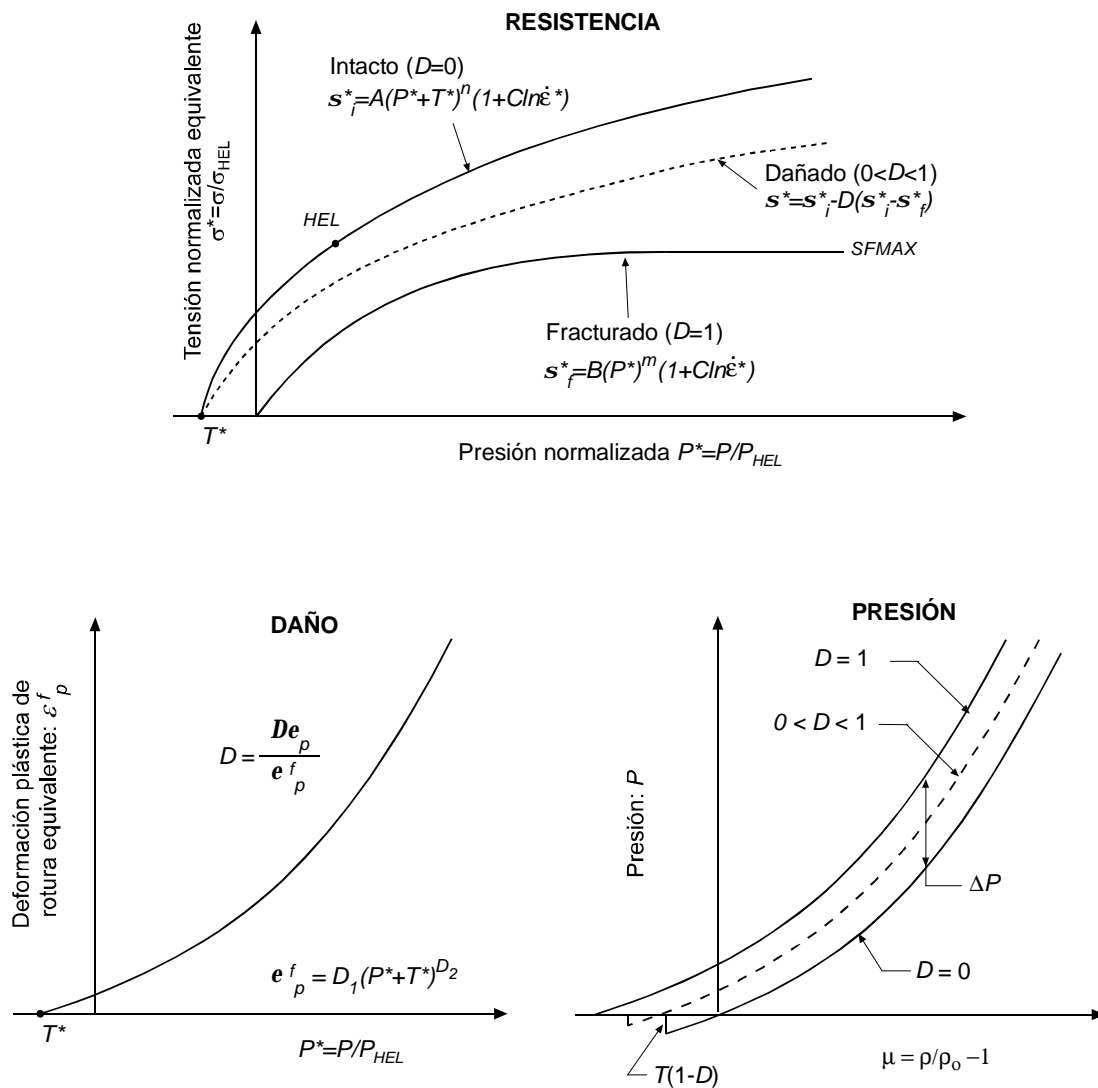


Figura 2.4. Modelo de Johnson Holmquist JH-2 para materiales frágiles.

2.2.2.3 Modelo de Rajendran-Grove

Este modelo está basado en mecánica de fractura y en el criterio de Griffith. Define un parámetro de daño g que representa una densidad de microfisuras adimensionalizada como:

$$(2-11) \quad g = N_0 a_{max}^3$$

donde N_0 es el número de microfisuras por unidad de volumen y a_{max} es el tamaño de la microfisura mayor, que se trata como una variable de estado interna. El número de microfisuras por unidad de volumen se supone constante en el sólido. Estas inician su crecimiento cuando el estado de tensiones cumple el criterio de Griffith generalizado:

$$(2-12) \quad s_{zz}^2 + \frac{1}{2(1+n)}(s_{xz}^2 + s_{yz}^2) \geq \frac{pRE}{2a_{max}(1-n^2)} \quad \text{para } s_{zz} > 0$$

$$(2-13) \quad \left(\sqrt{s_{xz}^2 + s_{yz}^2} - t \right)^2 \geq \frac{pRE}{a_{max}(1-n)} \quad \text{para } s_{zz} < 0$$

siendo z la dirección normal al plano de la microfisura, E el módulo elástico n el coeficiente de Poisson, a_{max} el tamaño de la microfisura R la energía por unidad de superficie necesaria para propagar la fisura y t la tensión debida al rozamiento entre las caras de la fisura, dada por:

$$(2-14) \quad t = t_0 - ms_{zz}$$

donde t_0 es la cohesión y m el coeficiente de rozamiento dinámico. Una vez alcanzado el criterio de propagación de fisuras, estas crecen de acuerdo con la siguiente ley:

$$(2-15) \quad \dot{a} = n_1 C_R \left(1 - \left(\frac{R}{G_I} \right)^{n_2} \right)$$

expresión en la que C_R es la velocidad de las ondas de Rayleigh, G_I la tasa de liberación de energía y n_1 y n_2 parámetros del modelo que se suponen distintos cuando la fisura se encuentra sometida a tracción y a compresión.

Se han determinado los parámetros para alúmina de 85% de pureza (Rajendran 1993) y más recientemente (Rajendran 1996) para carburo de silicio, carburo de boro y diboruro de titanio.

2.3 Aspectos microestructurales de la rotura dinámica de materiales cerámicos.

La mayoría de las roturas dinámicas pueden dividirse en tres clases: rotura por tracción, rotura por compresión y rotura por cortante. En materiales frágiles como los materiales cerámicos la rotura se produce por nucleación, crecimiento y coalescencia de grietas. La microestructura afecta tanto a la iniciación como al crecimiento de bandas de cortante, que son las precursoras del fallo en cortante y en tracción. La rotura por compresión es importante en materiales cerámicos y ocurre al activar pequeños defectos en el interior del material.

La rotura dinámica por tracción está determinada por el estado de cargas y la dinámica de la generación, propagación e interconexión de fisuras. Este tipo de rotura se caracteriza por una velocidad de propagación de fisuras

muy alta. Esta velocidad, V_C , ha sido estimada por varios autores (Louro 1989) y se supone limitada por la velocidad de las ondas de Rayleigh, C_R a través de la siguiente expresión:

$$(2-16) \quad V_C = C_R \left(1 - e^{a(K_I^2 - K_{IC}^2)} \right)$$

donde K_{IC} y K_I son el valor crítico y el valor actual del factor de intensidad de tensiones, respectivamente. Otro aspecto importante es la dependencia del tamaño de los fragmentos producidos en la rotura con la velocidad de deformación. Según ha demostrado Field (1985), al impactar un material cerámico a diferentes velocidades el número de fragmentos producido aumenta con la velocidad de impacto. También se ha demostrado (Louro 1989) que en condiciones de carga idénticas, mayores tamaños de grano producen menos fragmentación que tamaños de grano menores. Esto es debido a que cuando el tamaño de grano es mayor existen menos fronteras de grano, que pueden ser el origen de la fisuración.

La rotura por cortante puede tener origen microestructural o térmico. Hay que mencionar que las bandas de cortante adiabáticas son precursoras del fallo y proporcionan un camino para la propagación de grietas. En niveles microestructurales el material no es un sólido homogéneo y continuo. La iniciación de la localización del cortante puede ser activada por factores geométricos externos o por factores microestructurales. Los factores externos pueden ser lugares de concentración de tensiones, mientras que los factores microestructurales son regiones en las que se localiza un aumento de debilidad por algún motivo, como partículas fracturadas, acumulación de dislocaciones, o planos de deslizamiento. Las bandas de cortante adiabáticas son los lugares más idóneos para que se inicie el fallo, en los que las tensiones de tracción abrirán las grietas con facilidad.

La rotura dinámica por compresión se produce porque en determinados lugares a nivel microestructural se localizan regiones en las que aparecen tracciones importantes. Mientras que los materiales dúctiles pueden soportar grandes deformaciones de compresión sin que se produzca el fallo, en materiales frágiles como las cerámicas se generan pequeñas fisuras bajo tensiones de compresión. Esto es debido a que las tensiones de compresión aplicadas a un sólido frágil pueden generar tensiones de tracción localizadas debido a las inhomogeneidades microestructurales, que pueden iniciar un proceso de fisuración. Estos efectos microestructurales son los responsables de la rotura por compresión, y entre ellos se pueden mencionar los siguientes: huecos alrededor de los cuales se generan tensiones de tracción; bordes de grano entre granos de materiales diferentes o con anisotropía elástica en los que se producen incompatibilidades en tensiones elásticas; y fronteras de grano frágiles que se pueden fracturar debido a la aparición de tensiones cortantes producto de la compresión aplicada. En la figura, adaptada de Meyers (1994), pueden apreciarse estos tres mecanismos de fallo. El primer tipo responde a la configuración de huecos de tipo esférico en el interior del sólido, que bajo cargas de compresión se producen tensiones de tracción que dan lugar a fisuras en los bordes de los huecos en la dirección de aplicación de las cargas. En el segundo tipo, una fisura orientada de una forma aleatoria, provoca concentración de tensiones en sus extremos desembocando en la aparición de más fisuras que se abren por tracción. En este tipo de roturas puede comprenderse que el confinamiento limita este tipo de rotura, haciendo que al aumentar la presión de confinamiento aumente la resistencia a compresión. El tercer tipo de rotura por compresión se debe a la anisotropía elástica de los granos y la generación de dislocaciones y maclas, que pueden dar lugar a la formación de fisuras tanto al cargar como al descargar cuando la concentración de tensiones se localice en los bordes de grano. Lankford (1977) ha descrito este

tipo de situaciones que aparecen incluso cuando se somete el sólido a una fracción pequeña de la tensión de rotura.

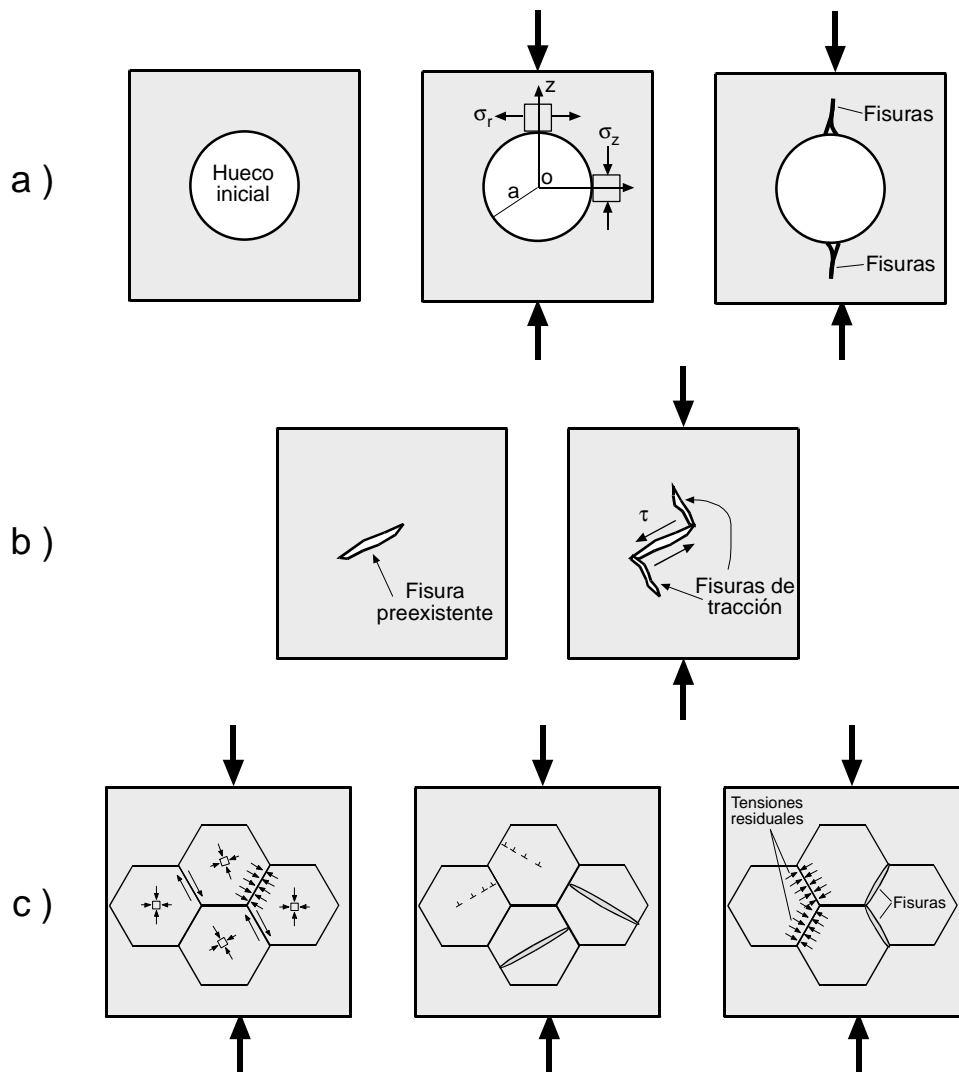


Figura 2.5. Mecanismos de formación de fisuras para cargas de compresión en materiales frágiles. Meyers 1994.

2.4 Técnicas de caracterización dinámica de materiales.

Existen numerosas técnicas de ensayo normalizadas para la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales a bajas velocidades de deformación. Sin embargo, el comportamiento de muchos materiales varía en función de la velocidad con que se aplican las cargas. Esta influencia de la velocidad de deformación puede ser comprobada incluso en las máquinas de ensayo convencionales sin más que variar la velocidad del actuador de dicho dispositivo. En muchas aplicaciones prácticas los materiales se someten a procesos de deformación a alta velocidad y es necesario tener información de las propiedades mecánicas en condiciones cercanas a las de servicio. Estas condiciones pueden estar muy lejos de las que proporcionan las máquinas de ensayo convencionales. En esta sección se comentan las técnicas de ensayo más empleadas para la determinación de propiedades mecánicas a velocidades de deformación elevadas, haciendo especial mención en aquellas técnicas que están hoy en día en uso para caracterizar materiales cerámicos.

Al aumentar la velocidad de deformación deben considerarse algunos aspectos característicos de los ensayos dinámicos. En la Figura 2.6 (Lindholm, 1971) se muestran los tipos de ensayo característicos incluyendo el método de aplicación de la carga, la velocidad de deformación media y el tiempo característico del ensayo. En ella, las divisiones que separan cada velocidad de deformación sirven para identificar los diferentes métodos de ensayo y no suponen regiones en las que varíe el comportamiento del material. Las técnicas de ensayos dinámicos cubren aquellos procedimientos en los cuales las fuerzas de inercia son apreciables. Los mayores problemas que aparecen en estos ensayos están asociados precisamente con la aparición de este tipo de fuerzas. En los ensayos considerados como

intermedios, la resonancia mecánica entre el dispositivo de ensayo y la probeta puede ser importante y debe ser tenido en cuenta. Cuando los ensayos se realizan por impacto de barras, la escala de tiempos se corresponde con el que tardan en recorrer una longitud característica en el dispositivo de ensayos las ondas elásticas a su velocidad de propagación. Cuando se trabaja a muy altas velocidades de deformación, la escala de tiempos y las dimensiones de la probeta deben ser las adecuadas para que se den condiciones de deformación uniaxial, generando un estado de tensiones tal que da lugar al paso y reflexión de ondas de choque en probetas de tipo plano. Otro de los efectos producido por la rapidez del ensayo está relacionado con la temperatura. Mientras que a bajas velocidades de deformación los ensayos son normalmente isotermos, cuando la velocidad de deformación es elevada el ensayo puede considerarse adiabático, ya que el calor generado durante el proceso de deformación no elástica no tiene tiempo de disiparse y la temperatura media de la probeta aumenta.

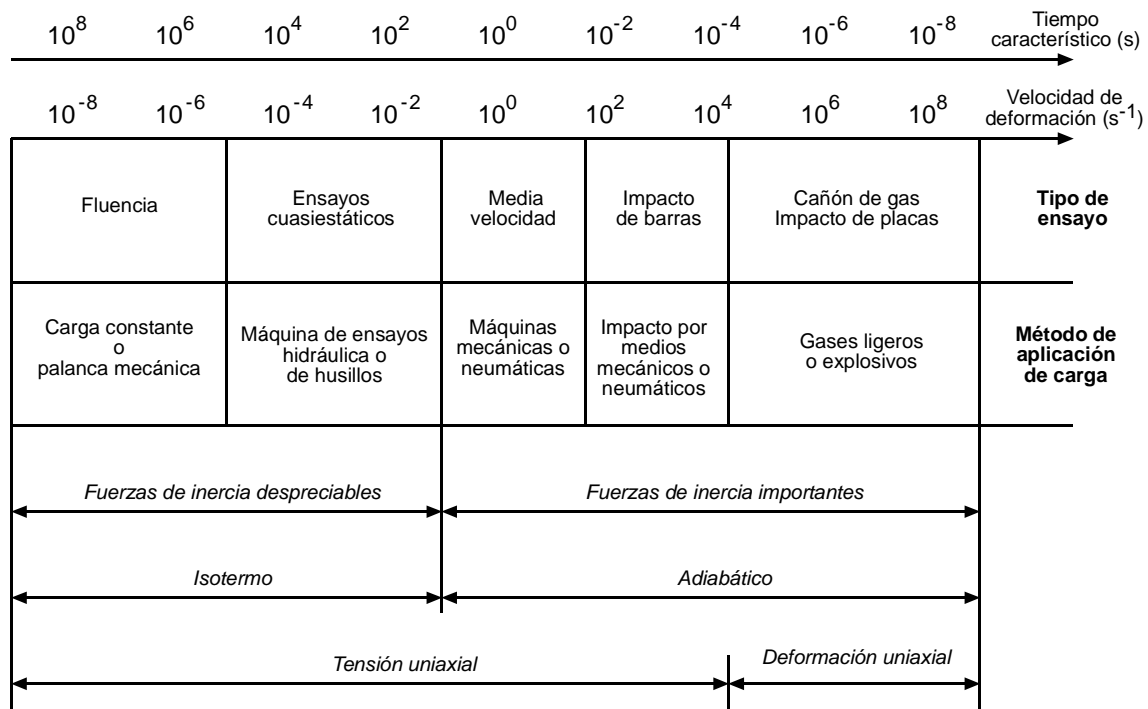


Figura 2.6. Aspectos dinámicos de los ensayos mecánicos.

En resumen, caracterizar materiales a alta velocidad de deformación requiere solventar todos los problemas anteriormente comentados desarrollando técnicas experimentales complejas que proporcionen medidas fiables de las propiedades del material.

A la complejidad asociada a los ensayos dinámicos hay que añadirle la derivada de las especiales características de los materiales cerámicos. Su elevada dureza hace necesario fabricar los elementos de transmisión de carga en materiales de similares características. Por otro lado, su elevada rigidez y fragilidad limitan las deformaciones y los desplazamientos de los dispositivos encargados de medir estas magnitudes, haciendo necesarios equipos de mayor precisión y en consecuencia mayor coste económico. En las próximas páginas se repasan los ensayos de caracterización de cerámicas más usuales en la actualidad.

2.4.1 Técnicas de ensayo de materiales cerámicos a velocidades de deformación bajas y medias

Las máquinas de ensayos convencionales, mecánicas o hidráulicas, permiten obtener velocidades en el actuador del orden de los centímetros por segundo, con lo que pueden obtenerse velocidades de deformación hasta aproximadamente 10^{-1} s^{-1} . Este tipo de ensayos se suelen considerar como cuasiestáticos y no entran en la categoría de dinámicos.

Los ensayos convencionales de compresión uniaxial en cerámicas de alto módulo elástico y elevada dureza no son fáciles de llevar a cabo, puesto que en cualquier diseño para determinar esta propiedad es probable que el fallo se produzca antes por cargas de tracción en alguna región del material. Además es probable que las deformaciones en el equipo de carga comienzan

a ser significativas, pudiendo sobrepasarse el límite elástico en los apoyos de la probeta. Por ello, para determinar esta resistencia en condiciones estáticas, se ha recurrido a máquinas de ensayos convencionales con sofisticados métodos de apoyos que introducen problemas de alineación (Tracy, 1987).

Cuando se realizan ensayos de tracción, los problemas de alineación son aún más acusados, siendo fundamental el diseño de rótulas y acoplamientos. Para determinar la resistencia a tracción estática de los materiales cerámicos se han propuesto una gran variedad de geometrías de probetas (Quinn 1991), como se muestra en la Figura 2.7, pero todas ellas hacen del ensayo de tracción simple un método caro y difícil de realizar. Para evitar estas dificultades, se han utilizado los ensayos de flexión en tres o cuatro puntos (Lankford 1978, Quinn 1990), como una buena aproximación para estimar la resistencia a tracción de los materiales cerámicos, pero no proporcionan el verdadero valor de esta propiedad al no estar el material sometido a un estado de cargas uniaxial. Los ensayos de compresión diametral de discos constituyen otra alternativa para determinar la resistencia a tracción de materiales que presentan una diferencia acusada entre la resistencia a compresión y la resistencia a tracción y su empleo está muy extendido en hormigón y materiales pétreos (Neville 1973, Rocco 1996). Su uso se ha extendido en los últimos años a los materiales cerámicos (Ovri, 1987). No obstante, estos ensayos adolecen del mismo problema que los de flexión en cuanto que la probeta se somete a un estado biaxial con tensiones de tracción junto con tensiones de compresión al menos tres veces superiores.

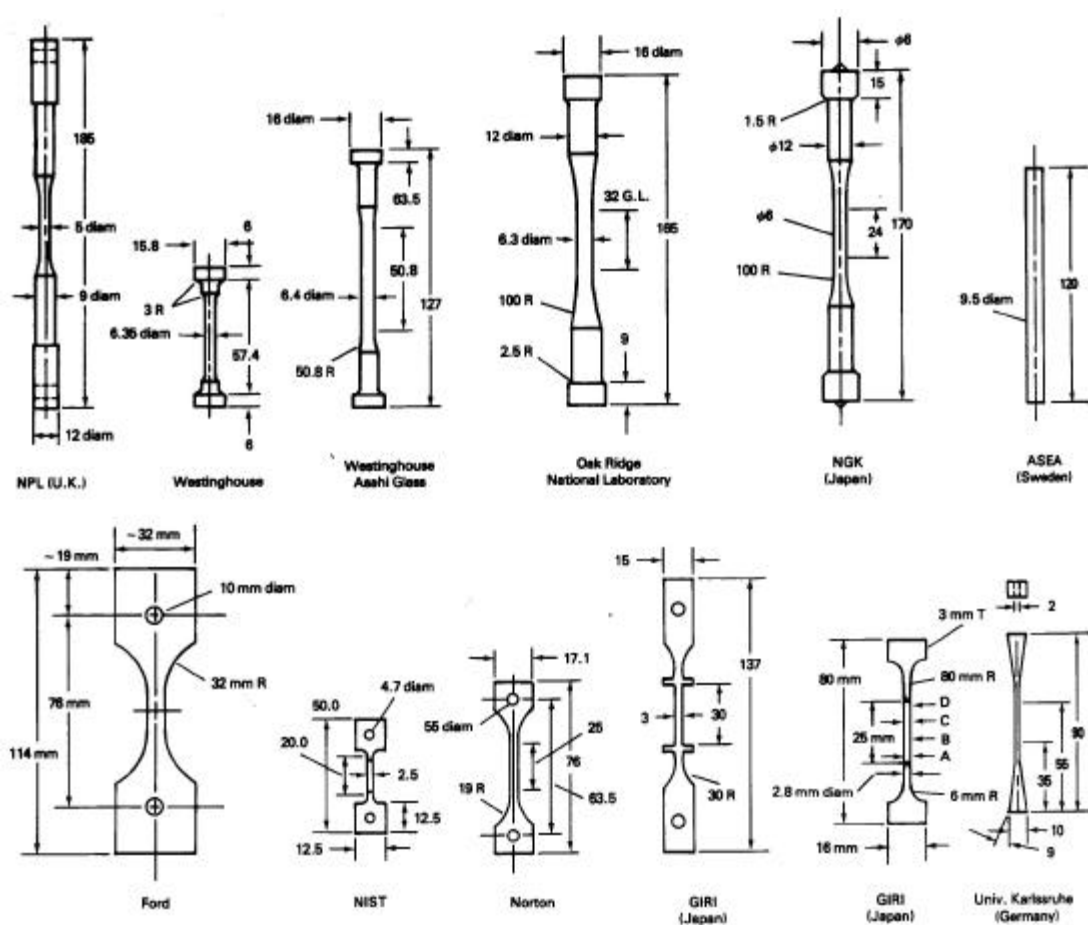


Figura 2.7. Diferentes tipos de geometría de probeta para la realización de ensayos de tracción común en materiales cerámicos.

Para llegar a velocidades de deformación más elevadas se puede recurrir a métodos neumáticos o a métodos mecánicos. En el tipo de máquinas neumáticas, las más comunes son las de actuador de tipo pistón (Maiden, 1966) como la representada en la Figura 2.8. En ellas se aplica un desplazamiento a uno de los extremos de la probeta mediante un pistón mientras que en el otro extremo la probeta se sujeta a una barra, que se encuentra instrumentada mediante bandas extensométricas, con objeto de medir la carga aplicada. La parte superior e inferior del pistón se encuentran comunicadas a dos depósitos que contienen un fluido gaseoso a

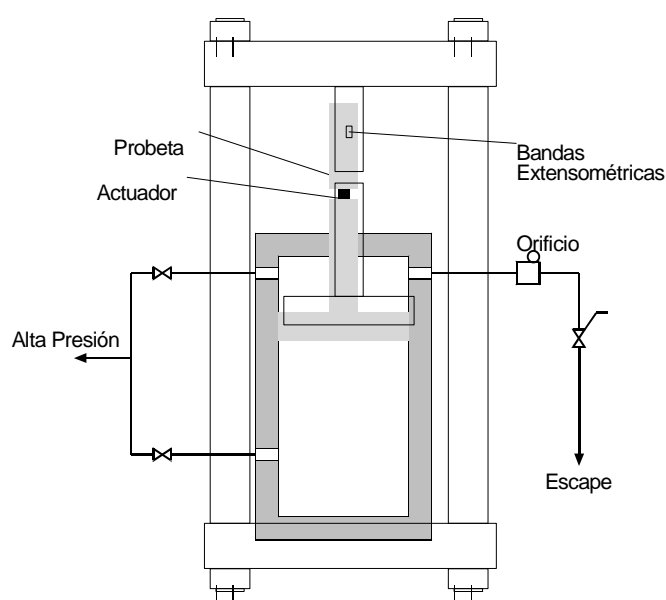


Figura 2.8. Máquina de ensayos neumática.

Los sistemas de tipo pendular, como el péndulo Charpy utilizan la fuerza gravitatoria para acelerar una masa e impactar sobre la probeta. Esta técnica se encuadra en las velocidades medias de deformación. Existen versiones en las que la masa del péndulo puede variar desde menos de 1 kg hasta unas 25 toneladas. La disposición de la probeta es la de un ensayo de flexión en tres puntos. Desde un ángulo inicial se deja caer el péndulo hasta golpear la probeta, situada en la vertical. Cuando el péndulo rompe la muestra, este asciende hasta otro ángulo diferente. Mediante un simple cálculo geométrico puede determinarse la diferencia de alturas que proporcionan los dos ángulos distintos, y a partir de ella obtener la energía absorbida en el impacto. Mediante esta técnica se puede obtener una medida cualitativa de la energía de fractura, aunque mediante péndulos instrumentados puede registrarse también la historia de fuerzas aplicadas y el desplazamiento del punto de aplicación de la carga, permitiendo con estos datos determinar la tenacidad de fractura.

La torre de caída, al igual que el procedimiento anterior, utiliza la fuerza gravitatoria para acelerar una masa aunque algunos equipos disponen de un sistema de aire comprimido que permite obtener mayores velocidades. Es un dispositivo mecánico que permite alcanzar velocidades de deformación consideradas medias. El tipo de ensayo más común con estos equipos es el ensayo de flexión en tres puntos, aunque ligeras modificaciones permiten la realización de ensayos de compresión. El funcionamiento es tan simple como dejar caer un peso sobre la probeta. En la Figura 2.9 se representa un esquema de este equipo. Desde una altura determinada se deja caer una masa guiada por unos carriles con un percutor acoplado que impacta sobre la probeta. El sistema se completa con una célula de carga, que puede estar situada en el percutor o en la base. En este último caso la influencia de las fuerzas de inercia en los componentes del sistema de carga es menor. La velocidad de impacto se mide a través de un sistema de células

fotoeléctricas. Se obtiene el registro de cargas en función del tiempo a velocidades de deformación que oscilan aproximadamente entre 1 y 10^2 s^{-1} . En algunos casos también se puede añadir una cámara ambiente que permite realizar ensayos a diferentes temperaturas o en diferentes condiciones ambientales. Algunos equipos también se complementan con un sistema neumático que acelera la caída de la masa permitiendo obtener mayores velocidades sin recurrir a mayores alturas de caída. Existen versiones que en algunos casos pueden llegar a 100 toneladas de capacidad.

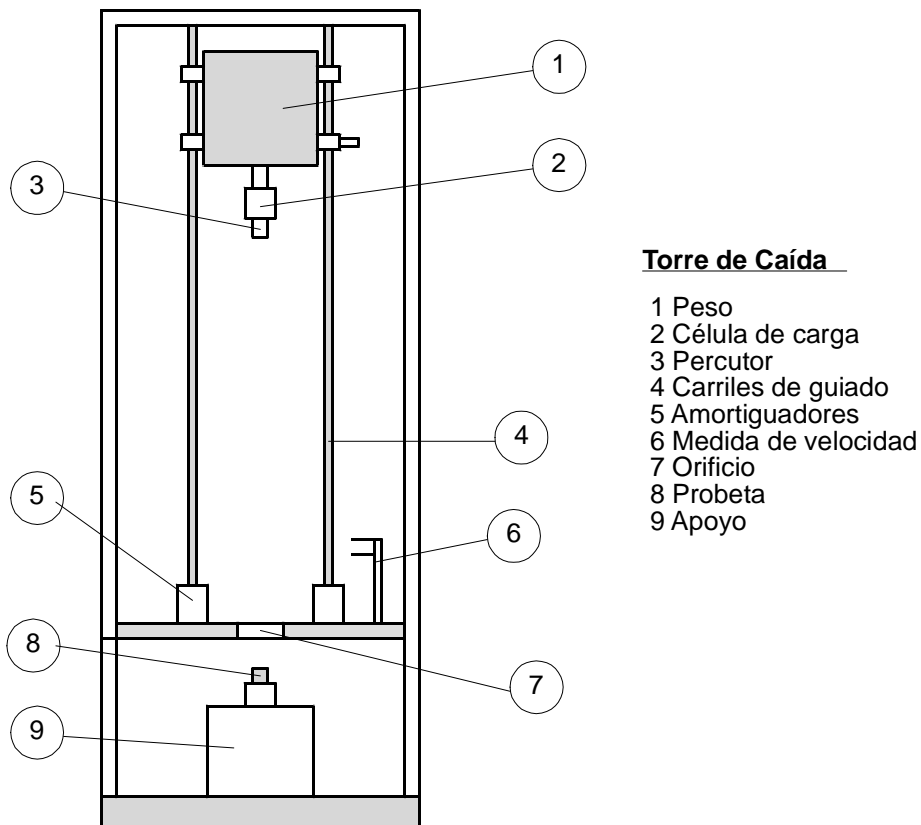


Figura 2.9. Torre de caída.

2.4.2 Técnicas de ensayo a velocidades de deformación altas.

Para realizar ensayos a velocidades de deformación consideradas altas, la técnica más usada es la barra Hopkinson, descrita inicialmente por Kolsky (1949) y basada en las observaciones de Hopkinson (1913). Mediante esta técnica pueden realizarse ensayos a velocidades de deformación del orden de 10^3 s^{-1} . Consiste en colocar una probeta entre dos barras de longitud mucho mayor que su diámetro y aplicar una carga repentina en uno de los extremos de una de las barras. De esta forma, mediante distintas variantes de este dispositivo, descritos en Johnson (1972) y Zukas (1982, 1990) pueden realizarse ensayos de compresión, tracción, torsión o flexión. La aplicación de la carga en el extremo de la barra suele hacerse mediante el impacto de un cilindro de acero sobre ella. Midiendo las deformaciones que sufren las barras es posible determinar la curva tensión deformación en la probeta bajo ciertas hipótesis. La medida de estas deformaciones se hace mediante bandas extensométricas adheridas a las barras. La resistencia a compresión en un material cerámico avanzado es muy difícil de determinar incluso en condiciones estáticas, pero en condiciones dinámicas es aún más complicado. Para determinar esta propiedad en condiciones dinámicas mediante la técnica de la Barra Hopkinson, la configuración empleada es la esquematizada como “a” en la Figura 2.10, en la que la probeta se coloca entre dos barras de acero y se impacta con un cilindro de acero sobre el extremo de una de ellas. Ha sido utilizada en metales como los ensayos de Lindholm (1971) o en cerámicos por Lankford (1981). Al ensayar de esta forma se pueden producir deformaciones plásticas en los extremos de las barras que están en contacto con la probeta si el material a ensayar es mucho más resistente que estas, como sucede en los materiales cerámicos avanzados. El ensayo en la Barra Hopkinson requiere que las barras permanezcan en régimen elástico durante el ensayo, y al colocar probetas cerámicas es fácil llegar a la plastificación de las barras en la zona de los

apoyos. Para solucionar este inconveniente, algunos autores han tratado de usar alúmina y carburo de tungsteno como protecciones en las barras (Staehler, 1993) o distintas geometrías de probeta (Chen, 1994). Para alcanzar velocidades de deformación aún mayores algunos autores (Wulf 1974, Gorham 1979) han suprimido la primera barra impactando directamente sobre la probeta (esquema b de la Figura 2.10).

Para realizar ensayos de tracción, el empleo de probetas de geometría tipo hueso es el más usado en materiales metálicos. El esquema “c” de la Figura 2.10 fue empleado por Harding (1960) y utilizando explosivos por Albertini (1974). La configuración “d” fue ya empleada por Lindholm (1968). Nicholas (1980) introdujo la utilización del collar, representado en el esquema “e” de la Figura 2.10. En materiales cerámicos, incluso con los sistemas más sofisticados de alineación, es muy difícil la realización de ensayos de tracción y son pocos los estudios de este tipo (Lataillade 1986). Por ello, como método alternativo se realiza el ensayo de compresión diametral o brasileño (Rodríguez 1994) representado en el esquema “f” de la Figura 2.10. Este método proporciona un valor de la resistencia a tracción del material, aunque como ya se ha comentado el estado de cargas en la probeta no es uniaxial.

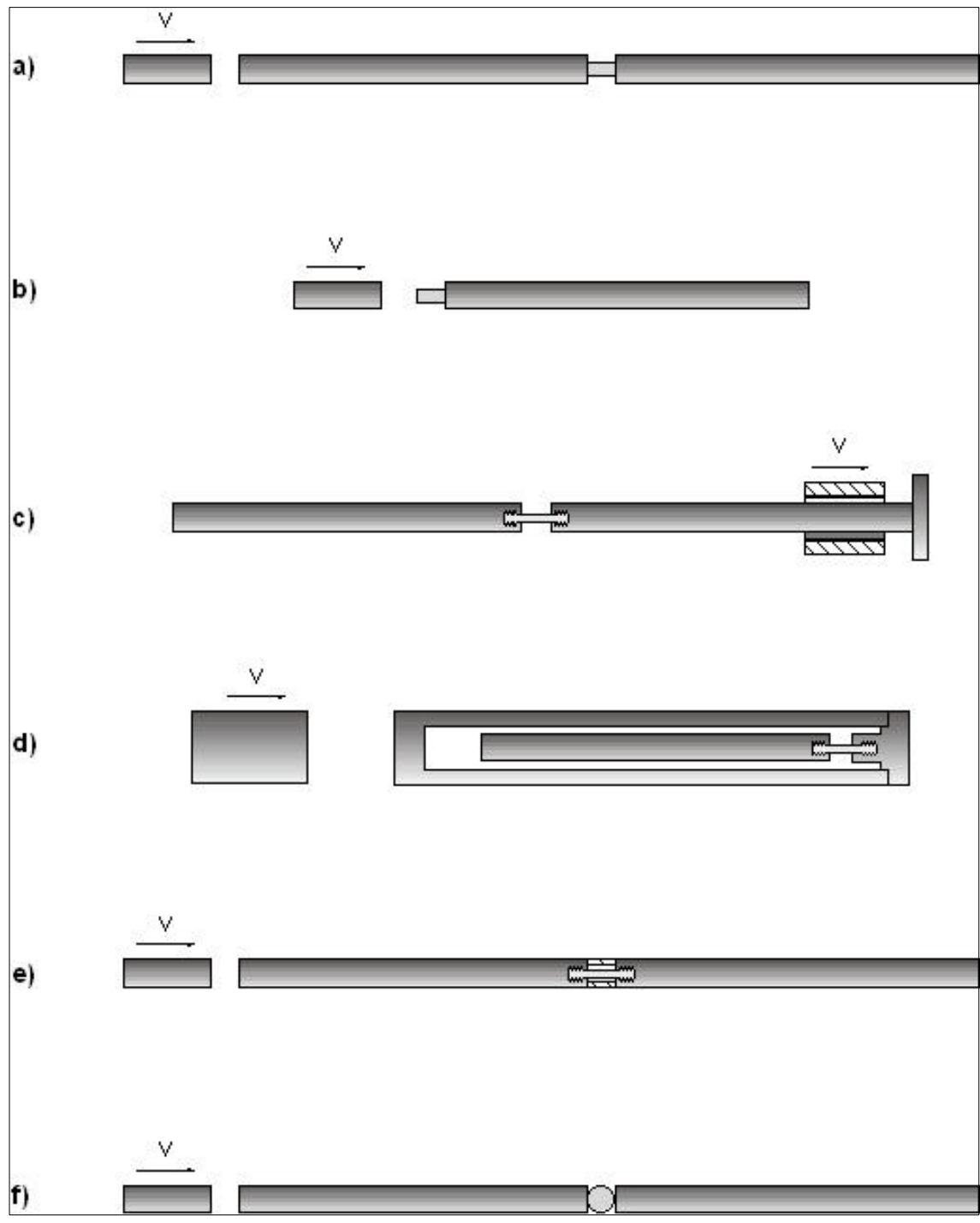


Figura 2.10. Configuraciones de diferentes versiones de la Barra Hopkinson

2.4.3 Técnicas de ensayo a velocidades de deformación muy altas.

Cuando la velocidad de deformación que se quiere imponer al material es mucho más elevada, hay que pasar de condiciones de tensión uniaxial a deformación uniaxial, y la técnica que se usa habitualmente es la de impacto de placas. Esta técnica permite obtener el límite elástico en condiciones de deformación uniaxial. El dispositivo de impacto de placas, que puede consultarse en Zukas (1982) y con más detalle en Yaziv (1985), se ha representado en la Figura 2.11. Es un dispositivo que permite caracterizar materiales a muy altas velocidades de deformación, superiores a 10^5 s^{-1} .

Consiste básicamente en lanzar una placa plana a unos cientos de metros por segundo contra otra placa fija, que es la probeta. El empleo de geometrías planas asegura que durante unos pocos microsegundos el estado tensional en la probeta sea de deformación uniaxial, existiendo únicamente deformaciones en la dirección del impacto. Esta situación se mantiene hasta que las ondas de tensión generadas se reflejan en los extremos de la probeta. Como consecuencia de la severidad del impacto se forman ondas de choque que se propagan a través del material con un frente muy abrupto de discontinuidades en la tensión, en la deformación y en la velocidad de las partículas (Rosenberg 1994). Este tipo de ensayo se utiliza para determinar la ecuación de estado además del límite elástico en deformación uniaxial o Hugoniot, σ_{HEL} . Durante el ensayo se produce un pulso de tensión que presenta una primera parte elástica seguido de otra parte plástica, según se indica en la Figura 2.12. La parte plástica está retrasada debido a que la velocidad de propagación de las ondas plásticas es menor que la de las ondas elásticas. La amplitud de la zona elástica del registro obtenido proporciona el Hugoniot. Diversos autores como Rosenberg (1991 y 1994), Kipp (1992) o Rajendran (1994 y 1996) han presentado ensayos en diferentes materiales

cerámicos como Al_2O_3 , NaAl , B_4C , SiC o TiB_2 . Para determinar las propiedades del material dañado por las tensiones que aparecen debido a la reflexión de la onda de choque Yaziv (1985) ha sofisticado el ensayo mediante la técnica de doble impacto. La probeta es impactada por dos placas separadas por una pequeña holgura. La primera placa produce la apertura de fisuras en el material por reflexión de ondas de tracción, mientras que la segunda placa cierra estas fisuras recompactando el material. En estos estudios se concluye que el fallo en materiales cerámicos ocurre al aparecer cargas de tracción, si bien por encima del Hugoniot el material puede dañarse por compresión.

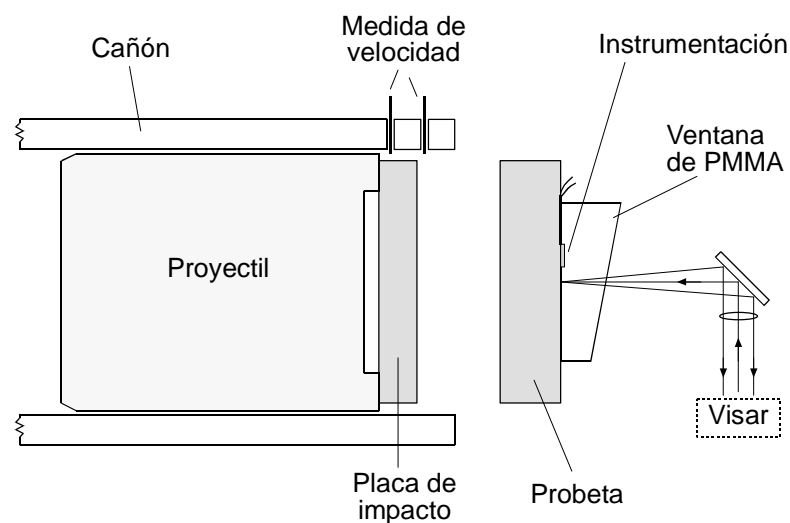


Figura 2.11. Esquema del dispositivo de impacto de placas.

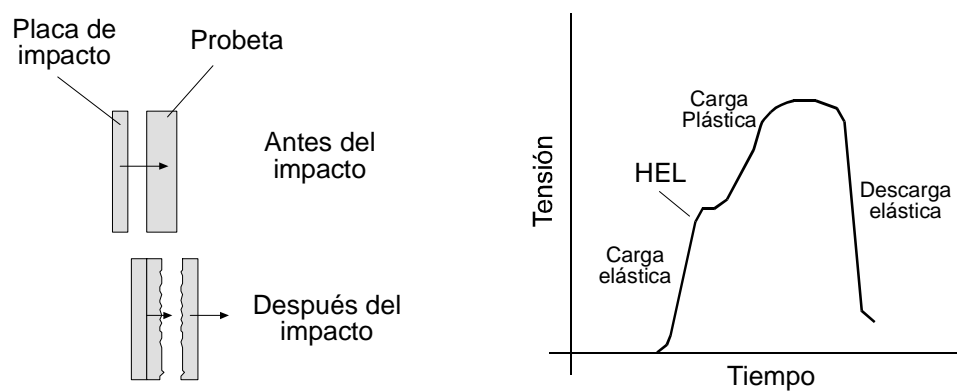


Figura 2.12. Rotura y resultados en el impacto de placas.

2.5 Técnicas de simulación numérica.

Las técnicas de simulación numérica que resuelven problemas dinámicos tienen ciertas peculiaridades que las hacen distintas de otros códigos numéricos. Una descripción general de estas técnicas puede consultarse en Zukas (1990). Los problemas dinámicos se caracterizan por: la presencia de ondas de choque, produciendo discontinuidades en velocidades o tensiones; una respuesta localizada del material, donde la configuración de la estructura tiene una importancia secundaria frente a las características y el comportamiento del material en las proximidades de la zona de aplicación de las cargas; y los tiempos de aplicación de las cargas y de respuesta son muy cortos, del orden de milisegundos o inferiores.

Las ecuaciones que gobiernan el comportamiento de los sólidos bajo cargas dinámicas o situaciones de impacto pueden ser encuadradas en cuatro categorías: ecuaciones de conservación (masa, momento lineal, momento angular y energía); ecuaciones constitutivas; criterios de fallo; y comportamiento posterior al fallo. Estas ecuaciones son fáciles de formular, pero difícil de resolver por lo que se recurre a una discretización espacial. Es por tanto necesario el formular una serie de ecuaciones discretas que en el límite presenten el mismo comportamiento que las ecuaciones en derivadas parciales originales. Los dos métodos que se emplean en los códigos que resuelven problemas de impacto y propagación de ondas son el método de diferencias finitas y el método de elementos finitos.

El método de diferencias finitas, descrito en Richtmeyer (1967) o Fried (1967), se puede considerar como una solución aproximada a un problema exacto. Esto se debe a que se tratan las ecuaciones que gobiernan el proceso físico en forma diferencial de forma que las derivadas se reemplazan por

operadores en diferencias análogas. Este procedimiento resulta en una serie de ecuaciones algebraicas que pueden ser resueltas por técnicas estándar.

El método de elementos finitos puede consultarse en Bathe (1982) o en Grandin (1986), es un método alternativo para discretizar las ecuaciones diferenciales en derivadas parciales en el dominio espacial. Aquí la discretización se introduce desde el principio y no se modifican las ecuaciones diferenciales ni se cambian las derivadas. En este método se reemplazan los infinitos grados de libertad por un sistema de grados de libertad finito de características aproximadas al modelo inicial. Por esta razón el modelo de elementos finitos se considera una solución exacta a un problema aproximado.

Los códigos de elementos finitos tienen ciertas ventajas al tratar con diferentes geometrías y variaciones en el tamaño de malla y tipo. Esto se debe a que en el método de elementos finitos las ecuaciones de movimiento se plantean como ecuaciones nodales de fuerzas para cada elemento sin que dependan de la forma de la malla que lo rodea. En cambio en los programas de diferencias finitas las ecuaciones de movimiento de cada elemento se plantean como gradientes de presión de las celdas que lo rodean. De todas formas, en la mayoría de los casos la forma discreta de las ecuaciones del movimiento de los códigos de elementos finitos son equivalentes a aquellas del método de diferencias finitas y no existe base matemática distinta entre los dos métodos. Por ello el grado de precisión de los dos métodos es similar.

La discretización espacial puede realizarse de dos formas distintas, euleriana y lagrangiana. En una representación lagrangiana la discretización se realiza en el material, y por tanto se deforma con él. En el caso de la aproximación euleriana, la discretización es espacial por lo que la masa fluye a través de las celdas. Cada uno de ellos presenta sus ventajas y

sus inconvenientes para cada tipo de problema, por lo que en ciertos casos uno será más apropiado que el otro y en otros casos ocurrirá lo contrario. Por ello los códigos suelen incluir ambas posibilidades.

Debido a que en los códigos lagrangianos no hay flujo de material entre las celdas de discretización, estos requieren menos cálculos por cada ciclo. Sin embargo, debido a que la malla se distorsiona al deformarse, y pueden llegar a producirse deformaciones elevadas, el tiempo de cálculo puede elevarse mucho. Esto se debe a que, en fenómenos de propagación de ondas, el paso de integración está basado en la dimensión del elemento más pequeño y cuando esta dimensión tiende a disminuir el tiempo de paso tiende a crecer al ser inversamente proporcional. La solución general para grandes distorsiones es el remallado. Pero mientras que el remallado permite solucionar este problema, si se realiza muchas veces puede llegarse a crear una malla semi-euleriana (si se remallara en cada ciclo el método se convertiría en cálculo euleriano). Para corregir el problema de las grandes deformaciones de los elementos algunos códigos introducen lo que se conoce como erosión. Este término no se refiere al fenómeno físico de la erosión. Bajo ciertas circunstancias, cuando se llega a una elevada deformación de la celda, esta se elimina. Los cálculos hechos con los algoritmos de erosión suelen mostrar una buena concordancia con los problemas para los que se ha diseñado, pero no son aplicables a otro tipo de situaciones. En problemas que presentan grandes deformaciones o cuando los materiales se pueden mezclar es necesario recurrir a un cálculo euleriano.

El proceso de cálculo suele recurrir a una integración de tipo explícito que se implementa fácilmente en los códigos. El tiempo de integración condiciona la estabilidad del cálculo y el tiempo máximo de integración se determina entre el cociente entre la mínima dimensión de celda y el máximo entre las

velocidades de las partículas o la velocidad de propagación de las ondas a través de la siguiente expresión:

$$(2-17) \quad \Delta t = \frac{\min(\Delta x)}{\max(c, u)}$$

donde c es la velocidad de propagación de las ondas del material, u la velocidad de las partículas y la minimización se hace en toda la malla.

Un aspecto importante es el tratamiento de los contactos. En problemas de impactos las diferentes mallas que componen tanto proyectil como blanco están obligadas a interactuar entre ellas. Para la localización de esta situación existen los llamados algoritmos de búsqueda de contactos. Estos algoritmos se encargan de determinar si un nodo atraviesa alguna superficie. Para establecer las condiciones de contacto, los algoritmos de contacto entre caras se encargan de imponer condiciones a los nodos que entran en contacto. Estos pueden estar basados en métodos de penalización con nodo maestro y nodo esclavo, o basados en los multiplicadores de Lagrange.

Otra cuestión particular de este tipo de cálculos numéricos se conoce como viscosidad artificial. Las ondas de choque son discontinuidades matemáticas que no se pueden acomodar directamente en la formulación continua que es base de los códigos numéricos. Para solucionar este problema se introduce una viscosidad artificial que suaviza los frentes de ondas de choque sobre unos pocos anchos de celda. Se utilizan términos lineales y cuadráticos que suavizan y amplían el frente de onda en la dirección de propagación y disminuyen su amplitud.

3 METODOLOGÍA DE ENSAYOS

3.1 Introducción.

En este capítulo se describen las técnicas de ensayo utilizadas en esta Tesis. El capítulo comienza con un breve resumen de la teoría de propagación de ondas elásticas unidimensionales en sólidos, haciendo especial mención a la propagación en barras largas. Este fenómeno sirve de base a varios de los tipos de ensayo empleados y por tanto su conocimiento es básico.

A continuación se describe la técnica experimental de la Barra Hopkinson, el método más extendido para la caracterización de materiales a velocidades de deformación elevadas. Su fundamento se basa en la propagación de ondas elásticas en barras largas. Con este método se realizaron ensayos de compresión y ensayos de compresión diametral, más conocidos como ensayos brasileños.

Los ensayos de compresión directa y los ensayos de tracción indirecta por compresión diametral a velocidades de aplicación de carga bajas se realizaron en máquinas de ensayo convencionales. Los ensayos en condiciones de carga dinámicas se realizaron mediante el empleo de la barra Hopkinson.

Una nueva técnica de ensayo, original de esta Tesis, está ampliamente descrita en este capítulo. Se ha denominado ensayos dinámicos de tracción directa o ensayos de *Spalling* debido a la palabra inglesa que describe el proceso y de la cual no se ha encontrado un equivalente en castellano. Esta técnica, basada también en los principios de propagación y reflexión de ondas elásticas en sólidos alargados, permite obtener la resistencia a tracción en condiciones de carga uniaxial.

También se incluyen en éste capítulo otras técnicas empleadas en la caracterización de los materiales como la excitación por impulsos que permite obtener el módulo de elasticidad en condiciones dinámicas y la velocidad de propagación de las ondas elásticas.

Finalmente se describen las técnicas de fotografía empleadas durante los ensayos y el sistema de iluminación utilizado.

3.2 Ondas elásticas unidimensionales en sólidos.

La teoría de propagación de ondas elásticas unidimensionales en sólidos está ampliamente tratada en Kolsky (1963) y en Rinehart (1975) y su aplicación a fenómenos de impacto se puede consultar en Zukas (1982 y 1991). En Johnson (1972) se describen las aplicaciones de la propagación de ondas elásticas más comunes.

Una onda de tensión es una perturbación de tensión que se propaga en el espacio. Si los valores de la tensión no superan el límite elástico del material, se habla de una onda elástica. En este caso, las ondas de tensión y deformación son proporcionales y además las deformaciones son recuperables, haciendo que una vez que la onda haya terminado de pasar por un punto del material, éste se encuentre en las mismas condiciones en que se encontraba antes del paso de la onda. La teoría de ondas elásticas indica que la propagación se realiza en dos tipos de ondas, longitudinales y transversales. Las ondas longitudinales son aquellas en que la dirección de propagación es paralela al movimiento de las partículas, mientras que en las ondas transversales la propagación de la onda es perpendicular a la dirección del movimiento de las partículas. La velocidad de propagación de las ondas elásticas longitudinales, c_L , es diferente de la de ondas transversales, c_T , y se muestran a continuación.

$$(3-1) \quad c_L = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$$

$$(3-2) \quad c_T = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$$

siendo E el módulo elástico del material, G el módulo de rigidez transversal y ρ la densidad del material.

A partir de ahora supondremos que las ondas se van a propagar en barras cuya longitud es mucho mayor que su diámetro. Además se asume que las barras siguen un comportamiento elástico, es decir las ondas de tensión no superan el límite elástico del material. Las ondas se propagarán en la dirección de las barras y el movimiento de las partículas tendrá lugar en la misma dirección. Por tanto, el movimiento de las partículas de las barras se determina aplicando la ley de Newton, dando lugar a la ecuación de ondas unidimensional:

$$(3-3) \quad \frac{\partial^2 u}{\partial t^2} - c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} = 0$$

donde u es el desplazamiento de las partículas de la barra, t es el tiempo, x es la longitud en el sentido de la propagación y la constante c es la velocidad de propagación de las ondas elásticas o velocidad del sonido en las barras. Esta ecuación se puede integrar, proporcionando el siguiente resultado:

$$(3-4) \quad u(x, t) = f(x - ct) + g(x + ct)$$

donde $f(x-ct)$ representa una onda que viaja en el sentido positivo del eje x , a velocidad c , mientras que $g(x+ct)$ representa otra onda que viaja en el sentido negativo a la misma velocidad. Las condiciones de contorno son las que determinan estas dos funciones.

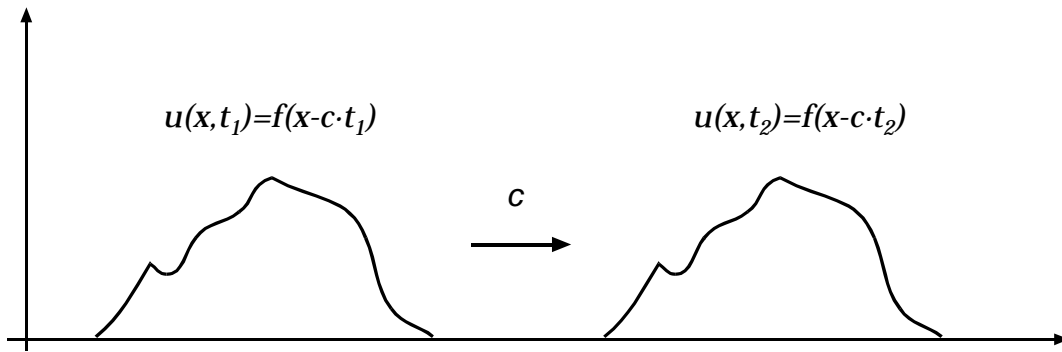


Figura 3.1. Avance de una onda unidimensional en un medio elástico.

La hipótesis de comportamiento elástico de las barras, permite medir las deformaciones que sufren mediante montajes de puentes de bandas extensométricas en las barras y por tanto determinar las funciones anteriores. La deformación, e , se puede calcular como la derivada del desplazamiento, u , respecto al espacio, x , y como se asume un comportamiento elástico para las barras la tensión, s , es proporcional a la deformación:

$$(3-5) \quad e(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial x} = f'(x - ct) + g'(x + ct)$$

$$(3-6) \quad s(x, t) = Ee(x, t) = E[f'(x - ct) + g'(x + ct)]$$

donde el apóstrofe en las funciones representa la derivada respecto a la variable entre paréntesis. Además se puede determinar la velocidad de cada partícula de la barra mediante la siguiente expresión:

$$(3-7) \quad v(x, t) = \frac{\partial u(x, t)}{\partial t} = -cf'(x - ct) + cg'(x + ct)$$

Teniendo en cuenta las expresiones de tensión y velocidad, se cumple que:

$$(3-8) \quad s = \pm rcv$$

expresión que usa el signo negativo en el caso de una onda que se desplaza en el sentido positivo del eje x , y el signo positivo en caso contrario.

Un caso particular e importante para los ensayos se produce cuando una barra de longitud determinada impacta sobre otra considerada semi-infinita. En este caso se crea un pulso de compresión de duración proporcional a la longitud de la barra que impacta. El tiempo de contacto coincide con el tiempo que tardan las ondas en recorrer el doble de la longitud de la barra:

$$(3-9) \quad t_p = 2 \frac{L}{c}$$

Otro caso a considerar corresponde a una onda que llega a un extremo libre de una barra. La condición de contorno a imponer es tensión nula en el extremo. Esto implica que una onda de compresión viajando por una barra se transformará en una onda igual y moviéndose en sentido contrario, es decir, reflejándose como onda de tracción. La ecuación que describe la tensión es en este caso:

$$(3-10) \quad s(x_{ex}, t) = E[f'(x_{ex} - ct) + g'(x_{ex} + ct)] = 0$$

luego se ha de cumplir que $f'(x - ct) = -g'(x + ct)$, tal y como se aprecia en la Figura 3.2.

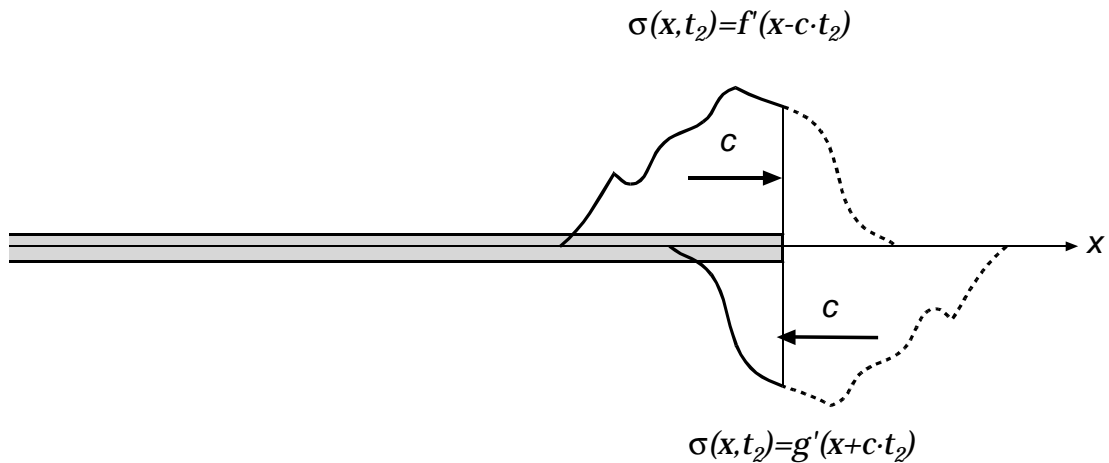


Figura 3.2. Reflexión de una onda en un extremo libre.

El estado tensional total es la suma de ambas ondas presentes en la probeta, como se expresa en la ecuación (3-6). Esta reflexión de ondas es la base de los ensayos de Spalling de materiales cerámicos, donde la reflexión de una onda de compresión de valor menor que la resistencia a compresión y mayor que la resistencia a tracción va a producir la rotura del material.

Cualquier cambio en las características del medio en el que se propagan las ondas, ya sea por variación del área, de la densidad o de otras características, modifica las condiciones de la propagación. Por ejemplo, cuando una onda, que llamaremos onda incidente, de tensión de valor s_I alcanza la superficie de separación entre dos barras en contacto con diferente sección transversal y de diferente material, parte de ella se transmitirá a la segunda barra dando lugar a una onda transmitida de valor s_T y parte se reflejará sobre la primera barra dando lugar a la onda reflejada s_R , según se muestra en la Figura 3.3. Esto ocurre siempre excepto cuando la onda incidente es de tracción y las barras estén simplemente en contacto sin ninguna fijación entre ellas, pues en este caso

las barras se separarían siendo la onda reflejada igual a la incidente y la onda transmitida nula.

Cuando la onda incidente es de compresión, existe onda transmitida y las condiciones de contorno a imponer en el contacto son igualdad de fuerzas y continuidad en velocidades. Esto es:

$$(3-11) \quad A_1(s_I + s_R) = A_2 s_T$$

$$(3-12) \quad v_I - v_R = v_T$$

y esta última expresión se puede escribir en función de las tensiones utilizando la ecuación (3-8) como:

$$(3-13) \quad \frac{s_I}{r_1 c_1} - \frac{s_R}{r_1 c_1} = \frac{s_T}{r_2 c_2}$$

y resolviendo s_R y s_T en función de s_I , se tiene que las ondas transmitida y reflejada son:

$$(3-14) \quad s_T = C_T s_I, \quad \text{siendo} \quad C_T = \frac{2A_1 r_2 c_2}{A_1 r_1 c_1 + A_2 r_2 c_2}$$

$$(3-15) \quad s_R = C_R s_I, \quad \text{siendo} \quad C_R = \frac{A_2 r_2 c_2 - A_1 r_1 c_1}{A_1 r_1 c_1 + A_2 r_2 c_2}$$

Si las dos barras tienen la misma sección, e introducimos el concepto de impedancia, definida como $z = r c$, estas expresiones se simplifican:

$$(3-16) \quad s_T = C_T s_I, \quad C_T = \frac{2z_2}{z_1 + z_2}$$

$$(3-17) \quad s_R = C_R s_I, \quad C_R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1 + Z_2}$$

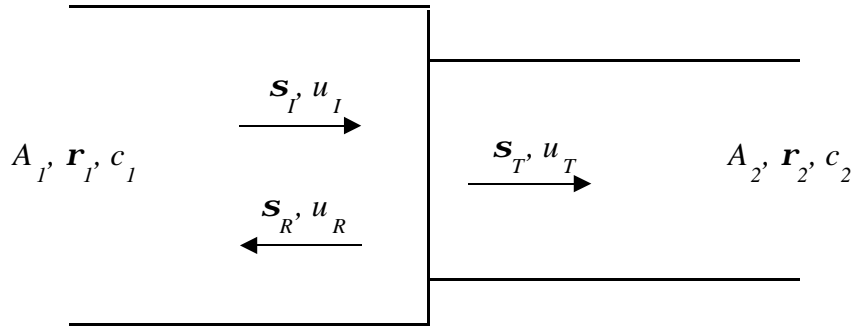


Figura 3.3. Transmisión y reflexión de ondas en cambio de sección y material.

A los coeficientes C_T y C_R se les denomina coeficiente de transmisión y coeficiente de reflexión respectivamente. El coeficiente de transmisión es siempre positivo, por lo que la onda transmitida tiene siempre el mismo signo que la onda incidente, es decir, si la primera es de compresión la segunda también lo será. El signo de la onda reflejada depende del signo de la diferencia de impedancias de ambos materiales, como puede deducirse de las expresiones.

Cuando ambos materiales tienen igual impedancia, resulta nulo el coeficiente reflexión y de valor unidad el de transmisión. No habrá onda reflejada y la onda transmitida será igual que la onda incidente.

Como ejemplo, en la Tabla 3.1 se muestran las diferentes impedancias para varios materiales. Los coeficientes de transmisión y reflexión cuando la

primera barra es de acero y la segunda de cerámica se muestran en la Tabla 3.2.

Tabla 3.1. Densidades, velocidades de propagación e impedancias de los diferentes materiales empleados en esta Tesis.

| Material | r (Kg/m ³) | c (m/s) | z (Kg/m ² s) |
|--|--------------------------|-----------|---------------------------|
| Acero | 7830 | 5092 | $39.87 \cdot 10^6$ |
| Al ₂ O ₃ 94% | 3658 | 9108 | $33.32 \cdot 10^6$ |
| Al ₂ O ₃ 98% | 3877 | 9717 | $37.67 \cdot 10^6$ |
| Al ₂ O ₃ 99.5% | 3905 | 10004 | $39.06 \cdot 10^6$ |
| SiC | 3132 | 11575 | $36.25 \cdot 10^6$ |
| B ₄ C | 2512 | 13549 | $34.03 \cdot 10^6$ |
| Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ | 4027 | 9292 | $37.42 \cdot 10^6$ |

Tabla 3.2. Coeficientes de transmisión y reflexión entre acero y los diferentes materiales cerámicos ensayados en esta Tesis.

| Materiales en contacto | C_T | C_R |
|--|-------|--------|
| Acero - Al ₂ O ₃ 94% | 0.911 | -0.089 |
| Acero - Al ₂ O ₃ 98% | 0.972 | 0.028 |
| Acero - Al ₂ O ₃ 99.5% | 0.990 | -0.010 |
| Acero - SiC | 0.952 | -0.048 |
| Acero - B ₄ C | 0.921 | -0.079 |
| Acero - Al ₂ O ₃ +ZrO ₂ | 0.968 | -0.032 |

En estos casos se aprecia que la onda transmitida es mayor del 90% de la onda incidente y la onda reflejada es de signo contrario que la incidente y de magnitudes comprendidas entre el 1% y el 9% de la perturbación inicial.

3.3 La barra Hopkinson.

La barra Hopkinson es la técnica experimental más extendida para determinar las propiedades mecánicas de materiales a altas velocidades de deformación. Su nombre se debe a un estudio realizado para determinar la duración de un impacto o percusión y la máxima presión generada por él, Hopkinson (1913). También se conoce como aparato de Kolsky, puesto que a él se debe el desarrollo del primer banco de pruebas, introduciendo la idea de situar la probeta entre dos barras, Kolsky (1949).

Esta técnica experimental permite ensayar materiales a velocidades de deformación que oscilan entre 100 y 10000 s⁻¹, aunque este intervalo puede verse alterado en determinadas circunstancias. Su funcionamiento se basa en la teoría de propagación de ondas elásticas unidimensionales y los ensayos que con frecuencia se realizan son el de compresión, el de tracción y el de torsión, y pueden consultarse en Zukas (1982). Esta técnica permite determinar la historia de cargas aplicadas sobre la probeta y los desplazamientos que sufren los extremos de las barras en contacto con la muestra, por tanto se obtiene la curva carga-desplazamiento.

Consta de un cilindro de acero o proyectil, que desliza por el interior de un tubo de acero que funciona a modo de cañón, dos barras instrumentadas mediante bandas extensométricas, un amortiguador o tope y un bastidor, como se ve en la Figura 3.4. El proyectil es impulsado por el aire a presión que proporciona un compresor.

El proceso de carga se crea como consecuencia del impacto del proyectil sobre la barra incidente, produciendo un pulso de compresión que viaja a lo largo de esta y que llamaremos onda incidente. Cuando este pulso llega al extremo de la barra y se encuentra con la probeta, una parte de él se refleja

y otra parte se transmite a la segunda barra. A estos dos pulsos los denominaremos onda reflejada y onda transmitida, respectivamente.

Suponiendo que las barras siguen un comportamiento elástico, pueden determinarse las deformaciones que sufren y por tanto las cargas que soportan mediante la colocación en las barras de puentes de bandas extensométricas. Esta instrumentación es la que proporciona los valores de las tensiones correspondientes a ondas incidente, transmitida y reflejada necesarias para el análisis del ensayo. Las ecuaciones que gobiernan el proceso son las descritas en el apartado anterior, y pueden aplicarse directamente a este procedimiento de ensayos. La geometría de las barras empleadas en esta Tesis es la que se aprecia en la Figura 3.5.

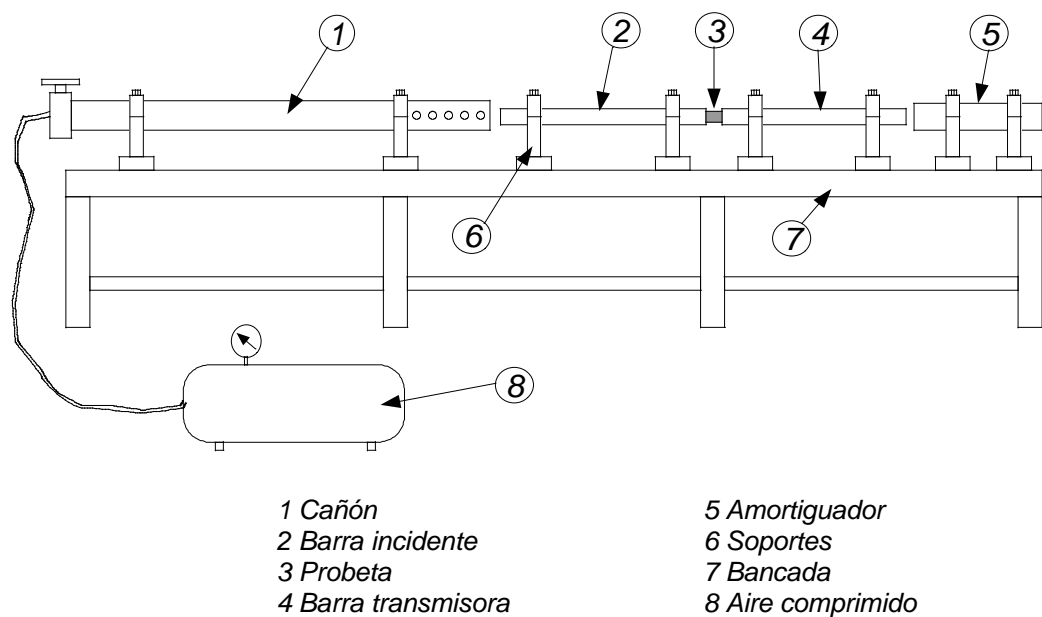


Figura 3.4. Esquema del banco de ensayos de Barra Hopkinson.

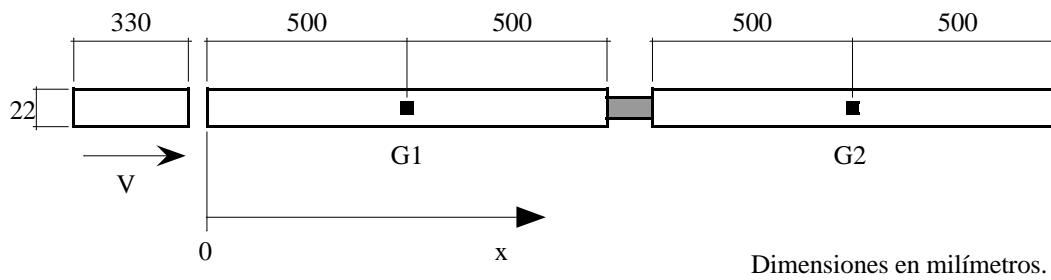


Figura 3.5. Configuración de la barra Hopkinson utilizada.

El proyectil se lanza contra la primera barra propulsado por aire comprimido, produciéndose en el contacto una onda de compresión sobre ella de duración determinada por la longitud del proyectil, mediante la siguiente expresión:

$$(3-18) \quad t_p = 2 \frac{L_p}{c}$$

La onda se desplaza sobre la barra incidente en dirección positiva del eje x. La tensión media generada por el impacto en la barra incidente puede determinarse a través de las ecuaciones de las ondas elásticas, resultando ser en el caso usual en que el material y la sección de la barra y el proyectil sean iguales:

$$(3-19) \quad \bar{s} = r c \frac{V}{2}$$

donde V es la velocidad con que impacta el proyectil. En consecuencia, variando la velocidad del proyectil podemos controlar la tensión generada en

las barras y modificando la longitud del proyectil podemos ajustar la duración del tiempo de aplicación de la carga.

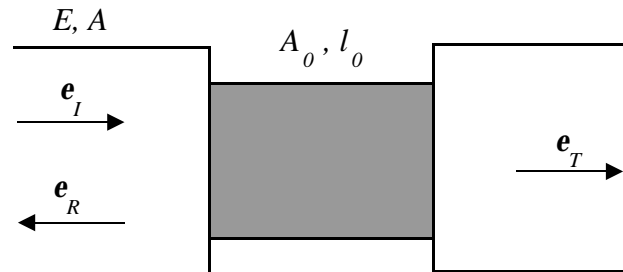


Figura 3.6. Esquema de la colocación de una probeta y de los pulsos de deformaciones.

Este pulso de compresión generado viaja a lo largo de la barra incidente, se registra en su instrumentación y alcanza la probeta. En ese instante, parte de la onda se refleja sobre la barra incidente y parte se transmite a través de la probeta a la barra transmisora. Mediante la instrumentación de la barra incidente se registran las ondas incidente y reflejada y en la barra transmisora se recoge la onda transmitida, que ha pasado a través de la probeta.

Las señales que se recogen de la instrumentación de las barras, tratándolas de forma adecuada, permiten determinar la carga aplicada sobre cada extremo de la probeta y el desplazamiento relativo entre ambos extremos en cada instante. Las fuerzas se pueden determinar con la teoría unidimensional de propagación de ondas elásticas, vista anteriormente, a partir de las siguientes expresiones:

$$(3-20) \quad F_a = AE(\mathbf{e}_I + \mathbf{e}_R)$$

$$(3-21) \quad F_b = AE\mathbf{e}_T$$

donde A y E son la sección y el módulo de elasticidad de las barras y las variables \mathbf{e}_I , \mathbf{e}_R y \mathbf{e}_T son las deformaciones de las ondas incidente, reflejada y transmitida respectivamente. Sin embargo, puesto que una de las hipótesis del ensayo en barra Hopkinson es que la probeta se encuentra en equilibrio, ambas fuerzas deben ser iguales y basta únicamente la señal registrada en la barra transmisora para determinar la carga. El equilibrio de la probeta puede expresarse mediante las siguientes condiciones:

$$(3-22) \quad F_a \cong F_b$$

$$(3-23) \quad \mathbf{e}_I + \mathbf{e}_R \cong \mathbf{e}_T$$

Usualmente, aunque las fuerzas en ambos extremos son iguales, existen ligeras desviaciones entre ellas, por lo que se suele calcular la fuerza media aplicada a la probeta, mediante la siguiente expresión:

$$(3-24) \quad \overline{F} = \frac{AE}{2}(\mathbf{e}_I + \mathbf{e}_R + \mathbf{e}_T) \cong EA\mathbf{e}_T$$

a través de la cual, si el ensayo realizado es de compresión, se puede determinar la tensión ingenieril a la que se somete a la probeta en cada instante mediante:

$$(3-25) \quad \mathbf{s}_{sp} = \frac{F_a + F_b}{2A_0} = E \frac{A}{2A_0}(\mathbf{e}_I + \mathbf{e}_R + \mathbf{e}_T) \cong E \frac{A}{A_0} \mathbf{e}_T$$

donde A_0 es la sección de la probeta y A es la sección de las barras. Los desplazamientos de cada uno de los extremos de las barras son los que permiten determinar el desplazamiento relativo entre ambos extremos, d :

$$(3-26) \quad u_a = c \int_0^t (\mathbf{e}_I - \mathbf{e}_R) dt$$

$$(3-27) \quad u_b = c \int_0^t \mathbf{e}_T dt$$

$$(3-28) \quad d = (u_a - u_b) = c \int_0^t (\mathbf{e}_I - \mathbf{e}_R - \mathbf{e}_T) dt$$

donde c representa la velocidad de propagación de las ondas elásticas en las barras. Si el ensayo realizado es de compresión, la deformación ingenieril experimentada por la probeta en cada instante se obtiene de estas expresiones, resultando:

$$(3-29) \quad \mathbf{e} = \frac{u_a - u_b}{l_0} = \frac{c}{l_0} \int_0^t (\mathbf{e}_I - \mathbf{e}_R - \mathbf{e}_T) dt \cong -\frac{2c}{l_0} \int_0^t \mathbf{e}_R dt$$

donde l_0 es la longitud inicial de la probeta. Así mismo, las velocidades de los extremos de las barras que proporcionan la velocidad de deformación durante el ensayo son:

$$(3-30) \quad V_a = c(\mathbf{e}_I - \mathbf{e}_R)$$

$$(3-31) \quad V_b = c\mathbf{e}_T$$

$$(3-32) \quad \dot{\mathbf{e}} = \frac{V_a - V_b}{l_0} = \frac{c}{l_0} (\mathbf{e}_I - \mathbf{e}_R - \mathbf{e}_T) \cong \frac{2c}{l_0} \mathbf{e}_R$$

Por tanto, mediante los ensayos en barra Hopkinson se puede determinar la curva carga desplazamiento que sufre la probeta en cada instante. Si el ensayo es de compresión también se determina la curva tensión deformación, y la velocidad de deformación durante el ensayo.

3.4 Ensayos de compresión.

3.4.1 Ensayos estáticos de compresión.

Se realizaron ensayos de compresión a baja velocidad de deformación en una máquina servohidráulica convencional modelo Instron 1270. Las probetas utilizadas fueron cilindros de 8 mm de diámetro con longitudes del orden de 3.5 mm.

Inicialmente, para aplicar la carga se colocó la probeta entre discos de alúmina, que a su vez se colocaron entre placas de alúmina entre los platos de la máquina de ensayos. Pero estos apoyos rompieron por punzonamiento con cargas menores de 50 kN, que corresponden a tensiones en la probeta de 1 GPa, cuando el fabricante proporciona para el material menos resistente el doble de este valor. Por este motivo se reemplazaron los apoyos por discos y placas de acero de alto límite elástico. Con ellos se llegó a romper las probetas de Al_2O_3 94% con cargas próximas a 100 kN. En los ensayos del resto de materiales se alcanzaron cargas de hasta 170 kN antes de que rompieran los discos de acero, lo que representa compresiones en las probetas de 3.4 GPa.

En este tipo de ensayos se registró la carga aplicada mediante una célula de carga de 250 kN con un error menor del 0.1%. El control de la máquina se llevó a cabo en desplazamiento a una velocidad constante del actuador de 0.2 mm/min. Las velocidades de deformación alcanzadas fueron del orden de 10^{-3} s^{-1} .

Los resultados de los ensayos realizados sobre los distintos materiales se comentan en el siguiente capítulo.

3.4.2 Ensayos dinámicos de compresión.

Se realizaron ensayos de compresión dinámicos mediante la técnica de la barra Hopkinson. Las probetas utilizadas fueron cilindros de 8 mm de diámetro con longitudes próximas a 3.5 mm. Debido a los resultados de los ensayos estáticos únicamente se ensayaron las probetas de Al_2O_3 94%, puesto que la barra Hopkinson empleada sólo permite llegar a 130 kN, valor insuficiente para alcanzar la rotura con el resto de materiales cerámicos ensayados.

Durante los ensayos, las barras empleadas fueron de acero de alta resistencia con 22 mm de diámetro y 1000 mm de longitud. La probeta se colocó entre dos discos de acero de alta resistencia del mismo diámetro que las barras y de 5 mm de espesor para evitar daños en las barras. Para disminuir el rozamiento entre la probeta y las protecciones se empleó grasa de disulfuro de molibdeno. La instrumentación colocada en las barras consistió en un puente de bandas extensométricas formado por cuatro bandas fabricadas por Micromeasurements Group modelo CEA-08-062UW-350. Para completar el sistema de adquisición de datos, se utilizaron acondicionadores de señal modelo Vishay 2200 y dos osciloscopios digitales modelo Tektronix 2220 y 2214 que permitieron obtener un registro de 1 ms de duración que contienen 4000 puntos con una resolución de 8 bits. Este registro se volcó a un ordenador personal mediante un puerto serie para su posterior análisis mediante hojas de cálculo.

En la barra incidente utilizada, el puente de bandas extensométricas está colocado en el centro y suficientemente alejado de los extremos de forma que onda incidente y onda reflejada no se superpongan. De esta forma podemos registrar ambas señales sin que se alteren mutuamente. En la instrumentación de las barras, el tiempo transcurrido entre el paso de la

onda incidente y reflejada será el tiempo que tardan las ondas en recorrer dos veces la longitud entre la instrumentación y el extremo, es decir, 1000 mm. El tiempo que dura el pulso de compresión inicial es el tiempo que tardan las ondas en recorrer dos veces la longitud del proyectil. Puesto que el proyectil empleado tiene una longitud de 330 mm, será el tiempo que tardan las ondas en recorrer 660 mm y por tanto, se garantiza que no se superponen onda incidente y reflejada.

En la Figura 3.7 se muestra un registro obtenido del osciloscopio digital. En él se encuentran recogidos dos canales, uno procedente de la instrumentación de la barra incidente y otro procedente de la de la barra transmisora. Ambas señales tienen diferente ganancia, por lo que sus amplitudes no guardan relación en el gráfico. De la señal de la barra incidente se extraen las ondas incidente y reflejada, mientras que de la otra se extrae la onda transmitida. Las señales positivas corresponden a ondas de compresión, mientras que las negativas son de tracción. Como puede observarse, ondas incidente y transmitida son ondas de compresión, mientras que la onda reflejada es una onda de tracción. Si se toman las señales de onda incidente y onda reflejada y se suman, se obtiene la onda transmitida como cabría esperar, según la expresión (3-23) obtenida anteriormente.

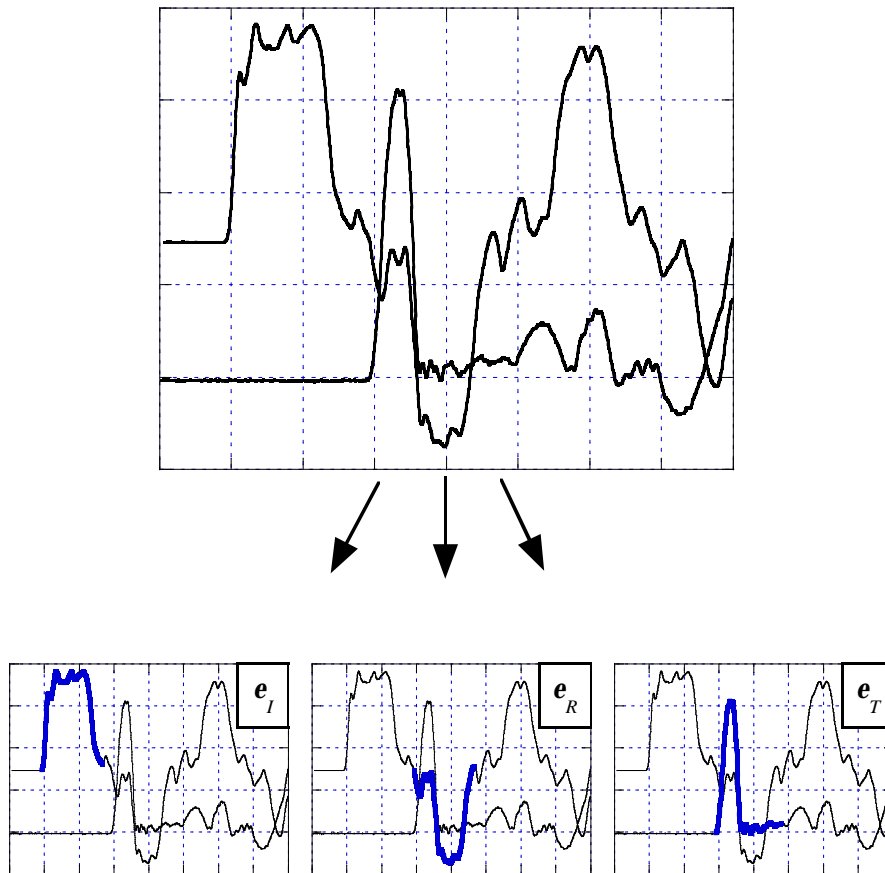


Figura 3.7. Obtención de las ondas incidente, reflejada y transmitida de la instrumentación de las barras.

Para determinar la carga aplicada, así como la velocidad de deformación durante el ensayo se emplearon las expresiones comentadas en el apartado en el que se describe la Barra Hopkinson y en particular la expresión (3-25) en la que las deformaciones son las medidas mediante la instrumentación de las barras. Para determinar la velocidad de deformación alcanzada durante los ensayos se empleó la expresión (3-32) obteniéndose valores que oscilaron entre 2000 s^{-1} y 3000 s^{-1} . Los resultados de los ensayos se comentan en el siguiente capítulo.

3.5 Ensayos de tracción indirecta por compresión diametral.

Para determinar la resistencia a tracción de materiales cerámicos se han utilizado los ensayos de compresión diametral o ensayos brasileños que proporcionan buenos resultados en materiales relativamente similares como es el hormigón (Neville, 1973). Estos ensayos se basan en la gran diferencia que existe en algunos materiales entre la resistencia a tracción y la resistencia a compresión. Este requisito lo cumplen los materiales cerámicos, y como se verá más adelante las cargas de compresión que aparecen no son suficientemente elevadas como para producir daño en el material. La probeta, de geometría cilíndrica, se somete a cargas de compresión según uno de sus diámetros y la rotura se produce cuando las tracciones generadas a lo largo del diámetro de carga alcanzan la resistencia a tracción del material, como se reproduce en la Figura 3.8. Previamente, en el Departamento de Ciencia de Materiales de la UPM se han obtenido algunos resultados de resistencia a tracción de materiales cerámicos, determinada mediante la realización de ensayos brasileños en condiciones dinámicas (Rodríguez 1994 y Gálvez 1997).

En esta tesis se han realizado ensayos a bajas velocidades de deformación en máquinas servohidráulicas universales y a altas velocidades de deformación mediante la técnica de la barra Hopkinson.

Una de las dificultades de interpretación de este tipo de ensayos se debe a que el material se encuentra sometido a un estado biaxial de tensiones en el que las tensiones de compresión son sustancialmente superiores a las de tracción que provocan la rotura. Las tensiones de tracción que aparecen, son máximas y constantes en el plano de aplicación de las cargas, mientras que

las tensiones de compresión no son homogéneas. Según la teoría de la elasticidad, que puede consultarse en Timoshenko (1972), las tensiones que aparecen en dicho plano son las siguientes:

$$(3-33) \quad s_t = \frac{2P}{pLD}$$

$$(3-34) \quad s_c = \frac{2P}{pLD} \left(\frac{D^2}{r(D-r)} - 1 \right)$$

donde P es la carga aplicada, r la distancia al punto de aplicación de una de las cargas, L la longitud de la probeta y D su diámetro, según se muestra en la Figura 3.8. Las tensiones de tracción son constantes en el plano mencionado, mientras que las de compresión son variables a lo largo de él con un mínimo en el centro geométrico que es tres veces superior a las de tracción. En la Figura 3.9 se representa esquemáticamente la distribución de tensiones en el plano de aplicación de la carga.

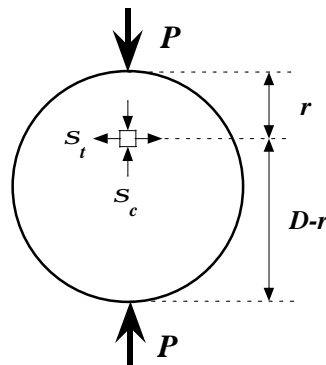


Figura 3.8. Tensiones en el plano de aplicación de las cargas en una probeta de un ensayo brasileño.

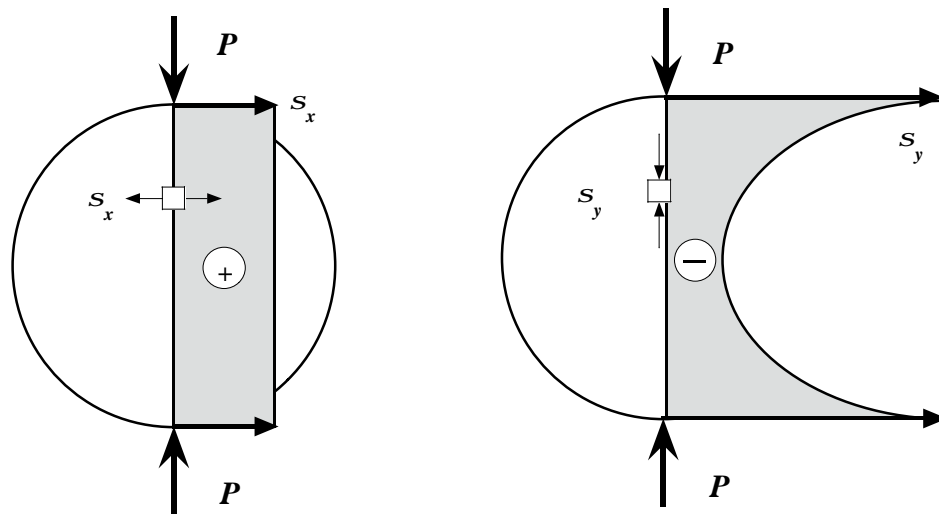


Figura 3.9. Esquema de la distribución de tensiones en el plano de aplicación de la carga

Por tanto, en este tipo de ensayos con materiales en los que la resistencia a tracción es mucho menor que la resistencia a compresión, la rotura se producirá por tracción en el plano de aplicación de las cargas. Debe tenerse también en cuenta que las tensiones de compresión pueden condicionar el lugar de la rotura.

Un aspecto importante a considerar al realizar este tipo de ensayos es lo que se denomina anchura de reparto. Una carga puntual es una situación ideal, pero en la realidad esta carga estará distribuida sobre una zona de mayor o menor espesor. Cuando esta zona es pequeña, la carga puede considerarse puntual a efectos prácticos sin que el error cometido sea importante. Si la zona de aplicación de la carga es menor del 10% del diámetro el error en la determinación de las cargas de tracción no supera el 2%, mientras que este error se reduce al 0.5% si la anchura de reparto es el 5% del diámetro. En Rocco (1996) puede consultarse un estudio detallado de este efecto. En los ensayos realizados, tanto estáticos como dinámicos, la probeta se colocó

entre dos apoyos cerámicos de alúmina. Mediante el estudio de la huella dejada en los apoyos se comprobó que la anchura de reparto fue en todos los casos analizados inferior al 10% del diámetro de la probeta, y en la mayoría de ellos estaba por debajo del 5%.

3.5.1 Ensayos estáticos de tracción indirecta por compresión diametral.

Los ensayos estáticos de compresión diametral se llevaron a cabo en máquinas servohidráulicas modelos INSTRON 8501 e INSTRON 1270.

La geometría de las probetas ensayadas fue de 8 mm de diámetro y 4 mm de longitud en la mayoría de los casos y de 12 mm de diámetro y 6 de longitud en algunos. Se colocaron entre dos apoyos de alúmina de forma prismática de 6 x 6 x 12 mm, y estos entre dos placas de alúmina de 10 mm de espesor. Este conjunto se colocó entre los platos de la máquina y la carga se midió, dependiendo del caso, mediante células de carga de 25 y 100 kN con error menor del 0.1%.

La velocidad de aplicación de la carga fue controlada fijando el desplazamiento entre los platos en un valor de 0.2 $\mu\text{m/s}$ en los ensayos más lentos y 2000 $\mu\text{m/s}$ en los ensayos más rápidos. Se obtuvo un registro de carga en función del tiempo por medio de una célula de carga y del desplazamiento de los platos de la máquina mediante LVDTs inductivos de $\pm 2.5\text{mm}$ con error menor del 0.1%. Con estas medidas se determinó la curva carga-desplazamiento, la carga máxima de rotura y la tensión de tracción máxima en la probeta.

Los resultados de los ensayos se comentan en el siguiente capítulo.

3.5.2 Ensayos dinámicos de tracción indirecta por compresión diametral.

Los ensayos a altas velocidades de deformación se llevaron a cabo en la barra Hopkinson del Departamento de Ciencia de Materiales de la UPM.

Las probetas, con la misma geometría que en los ensayos estáticos, se colocaron entre dos apoyos de alúmina de forma prismática de 6 x 6 x 12 mm. Este conjunto se dispuso entre dos discos de acero del mismo diámetro que las barras y de 5 mm de espesor con objeto de proteger las barras y evitar que se dañaran con los fragmentos procedentes de la rotura de la probeta. La disposición de la probeta se representa en la Figura 3.10.

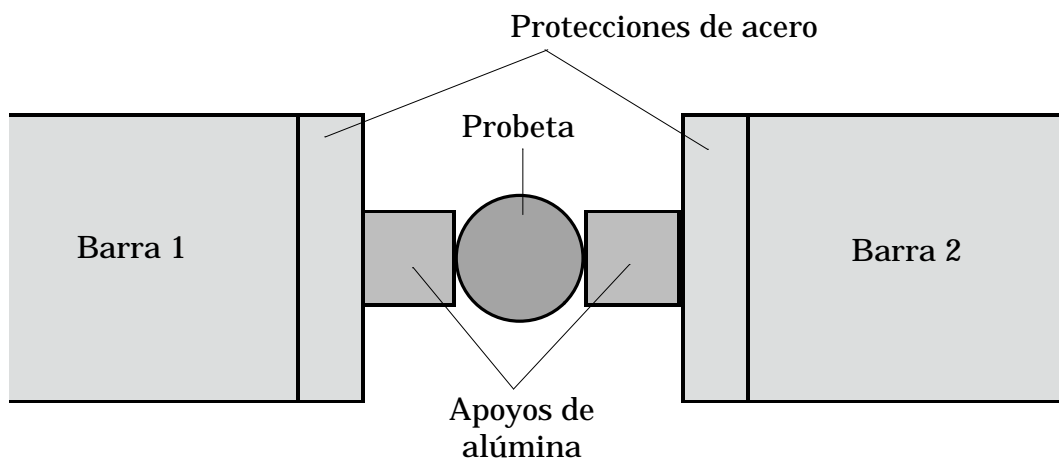


Figura 3.10. Esquema de la colocación de la probeta en un ensayo dinámico de tracción indirecta por compresión diametral

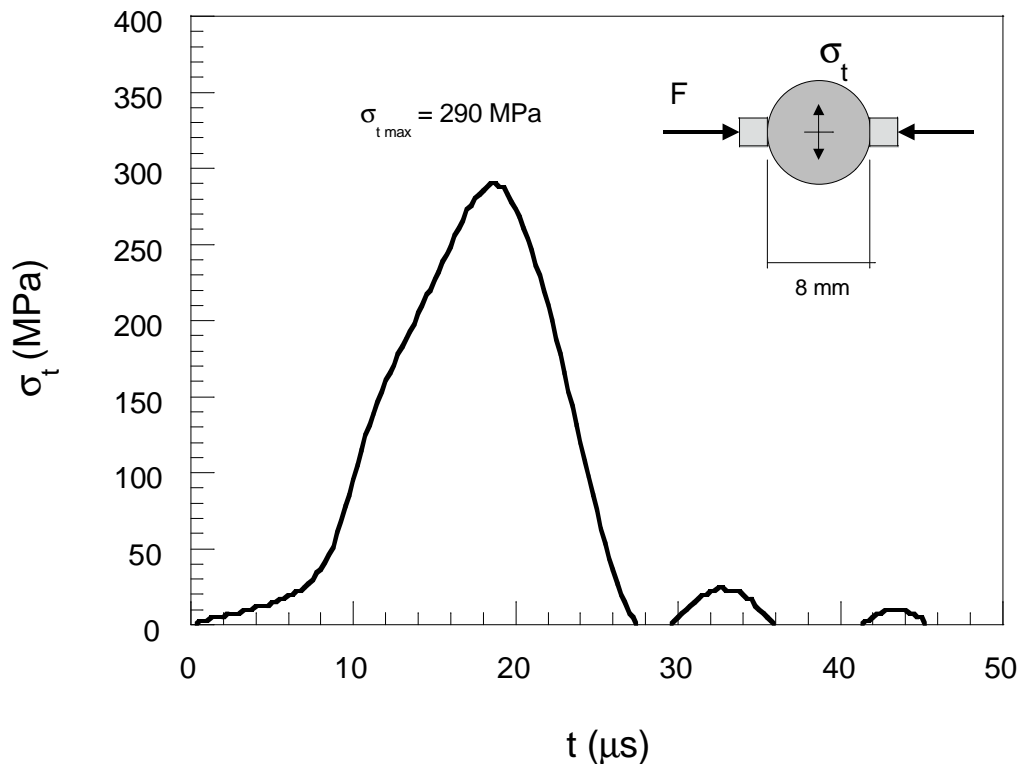


Figura 3.11. Registro de tensión en el diámetro de aplicación de las cargas frente al tiempo en un ensayo realizado sobre alúmina de 94%

Durante el ensayo se determinó la carga aplicada así como el desplazamiento entre las barras mediante las expresiones comentadas en el apartado anterior de la barra Hopkinson. La carga se obtuvo a partir de la expresión (3-24) y el desplazamiento a través de (3-28) en las que se utilizan los datos de las deformaciones medidas mediante la instrumentación en las barras. La adquisición de datos se realizó mediante un osciloscopio digital modelo Tektronix 2214 y un acondicionador de señal modelo Vishay 2200. De las medidas efectuadas se determinaron la curvas carga-tiempo y carga-desplazamiento, se midió la carga máxima de rotura y la tensión de tracción

máxima en la probeta. En la Figura 3.11 se muestra un registro carga-tiempo de un ensayo realizado sobre alúmina de 94%.

El ensayo se complementó con técnicas de fotografía ultrarrápida, tal y como se describe posteriormente en este capítulo. El objetivo fue determinar la validez del ensayo comprobando que la rotura se produce en el plano de aplicación de las cargas, tal y como predice la teoría elástica, y que la rotura de la probeta es anterior a la rotura de los apoyos. En la Figura 3.12 se muestra un ejemplo de un ensayo considerado válido, mientras que en la Figura 3.13 se muestra un ensayo considerado como no válido por haber roto uno de los apoyos antes que la probeta.

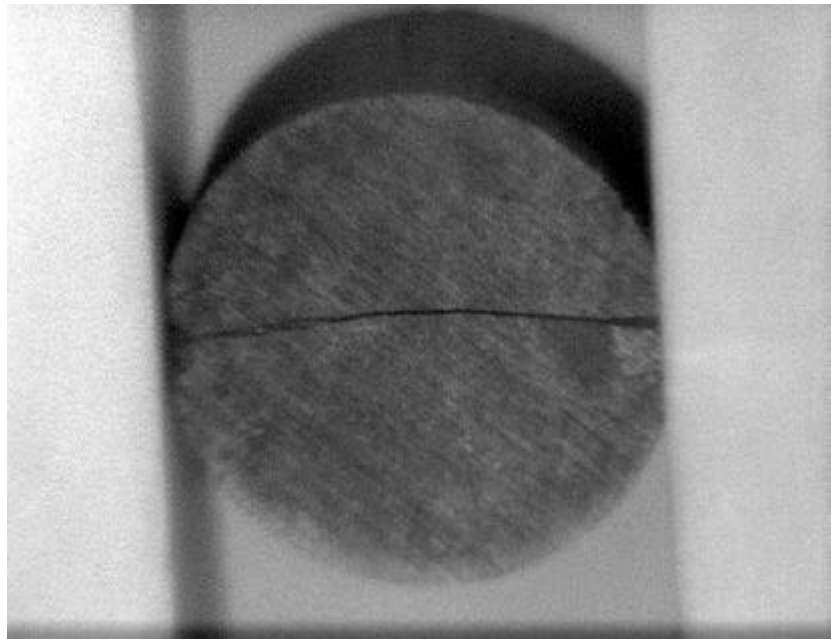


Figura 3.12. Ensayo de compresión diametral realizado sobre carburo de boro considerado válido. Los apoyos se encuentran intactos cuando la probeta ya se encuentra fisurada por su plano de simetría.

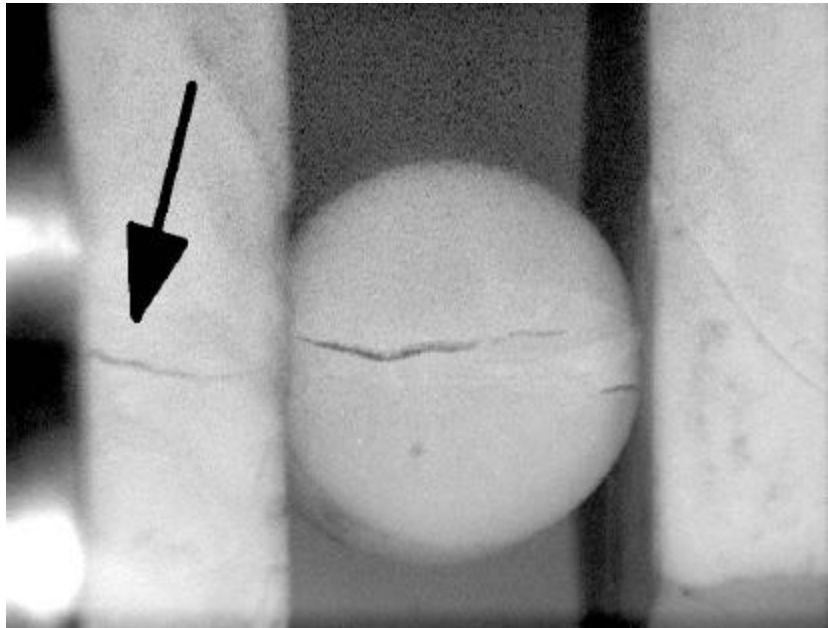


Figura 3.13. Ensayo de compresión diametral considerado no válido, debido a la prematura rotura de los apoyos.

Una de las hipótesis que rigen los ensayos en la barra Hopkinson exige que la probeta se encuentre en equilibrio antes de producirse la rotura. Para confirmar que se cumple esta hipótesis se realizó una modelización numérica del ensayo.

En la modelización se ha utilizado código comercial Autodyn 3D, comercializado por Century Dynamics. Es un programa de cálculo numérico basado en el método de las diferencias finitas y especialmente diseñado para cálculos dinámicos tridimensionales.

La modelización se realizó simulando la probeta y los apoyos cerámicos. En la probeta se emplearon 13260 nodos y 1024 en cada apoyo. El modelo de material utilizado fue elástico lineal con condición de fallo al alcanzarse un

valor umbral en la tensión principal mayor. Las propiedades de material utilizadas correspondieron a alúmina de 94% de pureza en la probeta y 99.5% en los apoyos. Se seleccionó la alúmina de 94% por ser el material ensayado que presenta menor velocidad de propagación de ondas elásticas y por tanto es el que más tarda en llegar al equilibrio. La condición de contorno impuesta fue el perfil de velocidades en los extremos de las barras que se determinó en un ensayo a partir de la instrumentación de las barras, aproximado por un trapecio. Este perfil de tensiones en el extremo incidente es el que se representa en la Figura 3.14.

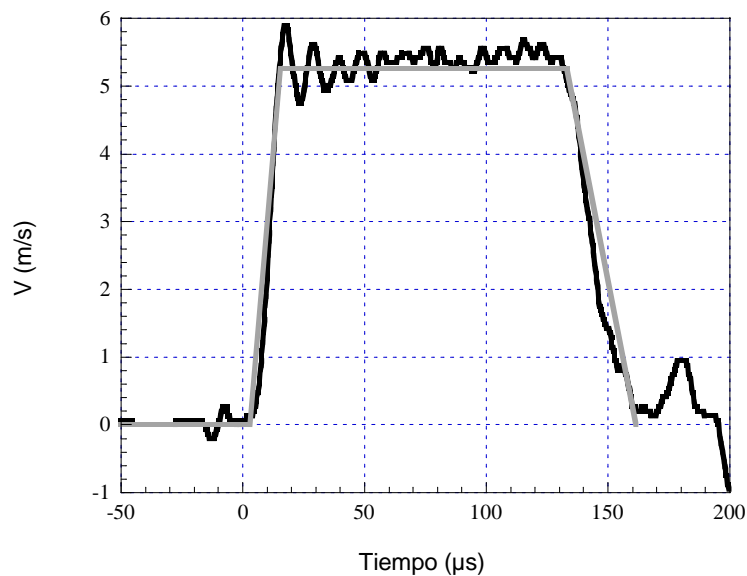


Figura 3.14. Perfil de tensiones registrado en la barra incidente en un ensayo real y su ajuste trapezoidal utilizado en las simulaciones numéricas.

Los resultados de las simulaciones numéricas realizadas muestran como a los 2 μs la onda llega al extremo de la probeta más cercano a la barra incidente, donde comienzan a aumentar las tensiones de forma asimétrica. Transcurridos 2 μs más, a los 4 μs , aparecen tensiones en ambos extremos de la probeta. Al llegar a los 6 μs , el equilibrio en tensiones es prácticamente

total. En este instante los valores de las tensiones de tracción en la probeta en el plano de aplicación de las cargas eran solamente de 60 MPa, aún muy por debajo de la resistencia a tracción. Por tanto se puede afirmar que se cumple la hipótesis de equilibrio, que la probeta llega a la rotura en condiciones de equilibrio de tensiones. Este proceso, Figura 3.15 y siguientes, se muestra a continuación

En las simulaciones numéricas realizadas del ensayo, la anchura de reparto fue del 7.5%. Esto es compatible con las observaciones en los ensayos, en los que la anchura de reparto osciló entre el 5% y el 10%.

Los resultados de los ensayos realizados sobre los distintos materiales se comentan en el siguiente capítulo.

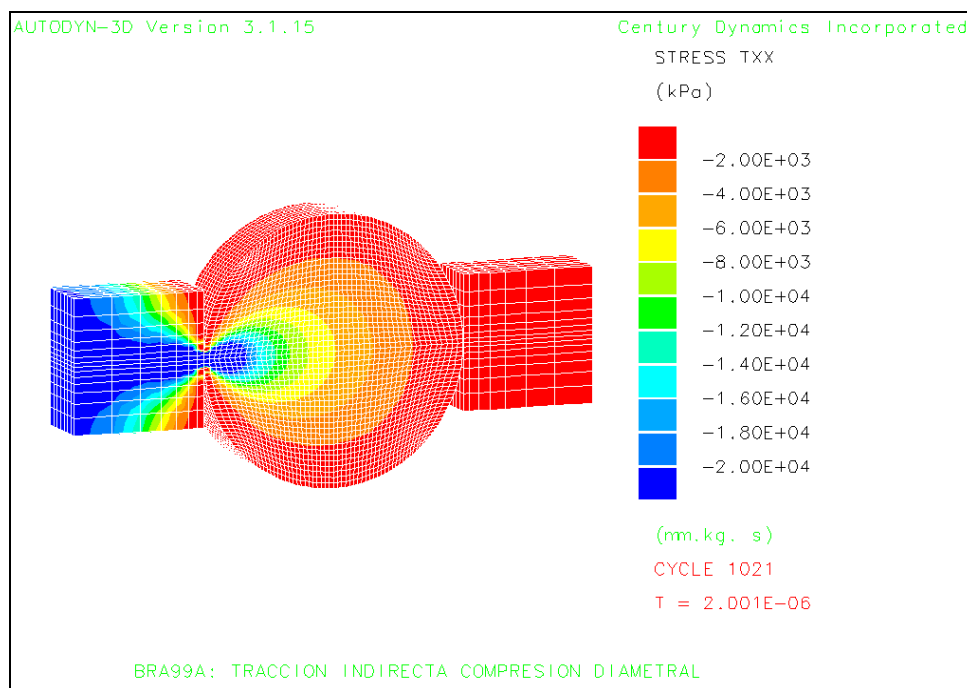


Figura 3.15. Simulación numérica del ensayo brasileño transcurridos 2 ms.

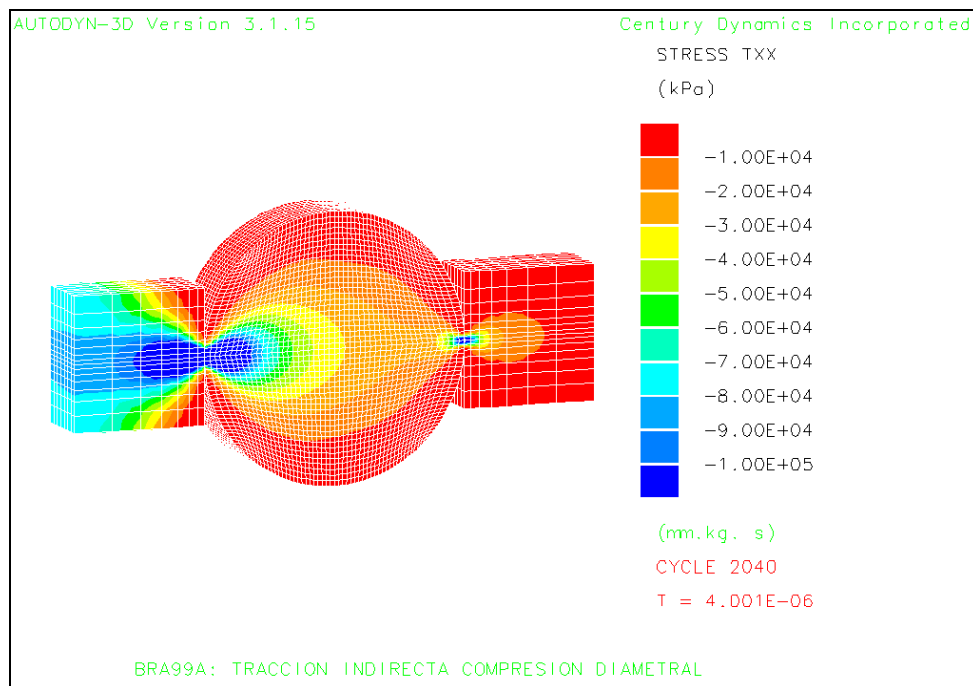


Figura 3.16. Simulación numérica del ensayo brasileño transcurridos 4 ms.

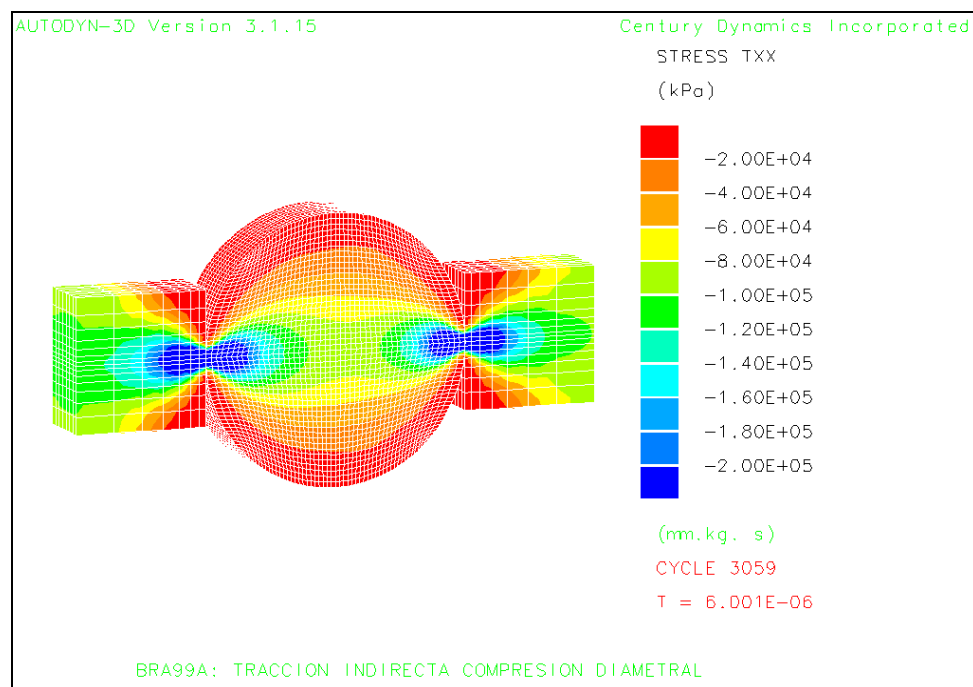


Figura 3.17. Simulación numérica del ensayo brasileño transcurridos 6 ms.

3.6 Ensayos de tracción directa por "spalling".

3.6.1 Principios del ensayo.

Esta es una nueva técnica de ensayo, original de esta Tesis, que permite determinar por primera vez la resistencia a tracción a altas velocidades de deformación de materiales frágiles en condiciones reales de carga uniaxial. Hasta ahora la resistencia a tracción se determinaba mediante ensayos indirectos, por lo que esta nueva técnica puede aportar una valiosa información sobre el comportamiento dinámico de los materiales cerámicos.

Su fundamento se basa en la propagación y reflexión controladas de ondas elásticas en el interior del material objeto de estudio. Para ello se ha diseñado y fabricado un dispositivo experimental, inspirado en los ensayos en barra Hopkinson e impacto de placas, cuyo esquema se representa en la Figura 3.18. Consta básicamente de un cilindro de acero, que a modo de proyectil impacta sobre una barra, también de acero, en la dirección de su eje. Esta barra, llamada barra incidente, es la encargada de transmitir las cargas a una probeta de geometría cilíndrica con un extremo en contacto con la barra incidente y con el otro libre.

Como consecuencia del impacto del proyectil, se genera una onda de compresión que viaja sucesivamente por la barra incidente y por la probeta para finalmente reflejarse en el extremo libre como una onda de tracción. La aparición de tensiones de tracción en la probeta produce la rotura del material.

La barra incidente y la probeta se encuentran instrumentadas para recoger sus deformaciones y, por tanto, determinar el pulso de compresión generado en el impacto. A través de estos registros y de la posición de la primera

fisura que aparece en la probeta se determina la resistencia a tracción del material.

El método descrito exige para su aplicación ciertas hipótesis, resumidas en la Tabla 3.3, que hacen referencia al material y a la configuración del ensayo. Las hipótesis que ha de cumplir el material que se ensaya son las siguientes: el método es únicamente aplicable cuando la resistencia a compresión es mucho más elevada que la resistencia a tracción; el comportamiento del material bajo las cargas aplicadas durante el ensayo ha de ser elástico y lineal; y las compresiones previas que sufre la probeta antes de la aparición de tensiones de tracción no deben introducir ningún daño al material. Por otra parte, la configuración del ensayo debe garantizar que la propagación de ondas pueda ser considerada unidimensional y que durante el ensayo se pueda localizar con precisión una única fisura inicial, aunque puedan aparecer fisuras adicionales posteriores.

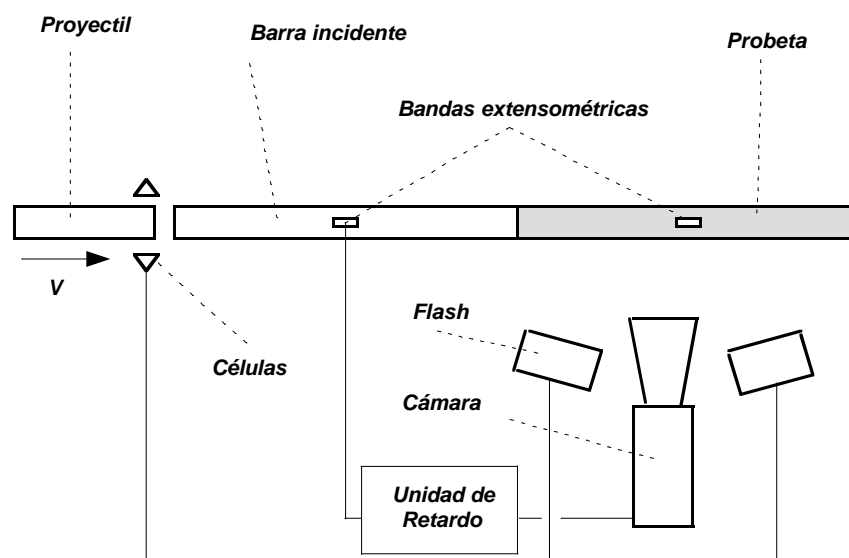


Figura 3.18. Dispositivo experimental de ensayos de "Spalling".

Tabla 3.3. Hipótesis necesarias para el ensayo.

| Hipótesis | |
|---|--|
| <i>Material</i> | <i>Ensayo</i> |
| <i>Comportamiento elástico lineal</i> | <i>Propagación de ondas unidimensional</i> |
| <i>Resistencia a compresión mucho mayor que la resistencia a tracción</i> | <i>Rotura inicial única</i> |
| <i>Compresiones iniciales no producen daño</i> | |

El cumplimiento de las hipótesis referentes al material son esenciales para la realización misma del ensayo. Como ya se ha comentado, en esta Tesis el estudio se ha centrado en materiales cerámicos avanzados, que presentan una resistencia a compresión alrededor de un orden de magnitud superior a la resistencia a tracción. Su comportamiento es elástico y lineal hasta rotura como indican los distintos ensayos realizados y las cargas de compresión a las que se somete la probeta no superan en ningún caso el 25% de la resistencia a compresión del material. En consecuencia, los materiales verifican en gran medida los requisitos exigidos por el método de ensayo.

En cuanto a las hipótesis relativas a la configuración del ensayo puede decirse que la teoría unidimensional de propagación de ondas elásticas está justificada cuando se utilizan, como en este caso, barras largas con una relación longitud/diámetro elevada. La necesidad de que se produzca una única rotura inicial no está asegurada para todos los materiales y, como se verá más adelante será imprescindible modificar la geometría del proyectil para determinar la resistencia a tracción de forma inequívoca.

3.6.2 Dispositivo experimental.

El primer paso del trabajo experimental consistió en diseñar, fabricar y calibrar un banco de ensayos específico. Todo el diseño fue realizado por el autor de esta Tesis y la fabricación fue llevada a cabo entre el taller del Departamento de Ciencia de Materiales de la UPM y un taller de mecanizados de precisión. El dispositivo experimental se muestra en la Figura 3.19 y un detalle del mismo puede observarse en la Figura 3.20.

El conjunto está montado sobre una bancada rígida formada por una antigua mesa de fresadora rehabilitada, sobre la que se ha mecanizado una ranura en forma de V. La bancada asegura una estabilidad y rigidez a todo el conjunto, mientras que la ranura es la responsable de una correcta alineación de todo el dispositivo y por ello fue mecanizada en un taller de precisión mediante una sola pasada de fresadora. Sobre esta ranura se coloca un tubo que hace de cañón de 35 mm de diámetro exterior, los casquillos y el sistema de recogida de fragmentos.

El cañón está formado por un tubo de 600 mm de longitud, 35 mm de diámetro exterior y 25 mm de diámetro interior. El tubo está lapeado (rectificado en su superficie interior) con objeto de que la superficie por la que va a deslizarse el proyectil sea lo más lisa posible. En el extremo por el cual se alimenta el aire comprimido con el que se acelera el proyectil, se ha acoplado una válvula que se acciona manualmente. El aire comprimido procede de un compresor, de forma que modificando la presión de alimentación se puede variar la velocidad del proyectil. En el extremo opuesto del cañón, como se aprecia en la Figura 3.20, se han mecanizado unos orificios para permitir la salida del aire después de que se produzca el impacto, y en los que se alojan las células fotoeléctricas que miden la velocidad del proyectil en el instante del impacto. El cañón se fija a la

bancada mediante unos soportes en forma de puente diseñados exclusivamente para tal fin.

Los casquillos, del mismo diámetro que el cañón, soportan la barra incidente y la probeta, y tienen un sub-casquillo interior de teflón que asegura el perfecto deslizamiento de las barras y de la probeta sin rozamiento apreciable. El diámetro interior de estos casquillos es de 8 mm, para ajustar perfectamente con el diámetro de las barras y de las probetas ensayadas. Los casquillos se fijan a la bancada mediante los mismos soportes en forma de puente utilizados para fijar el cañón.

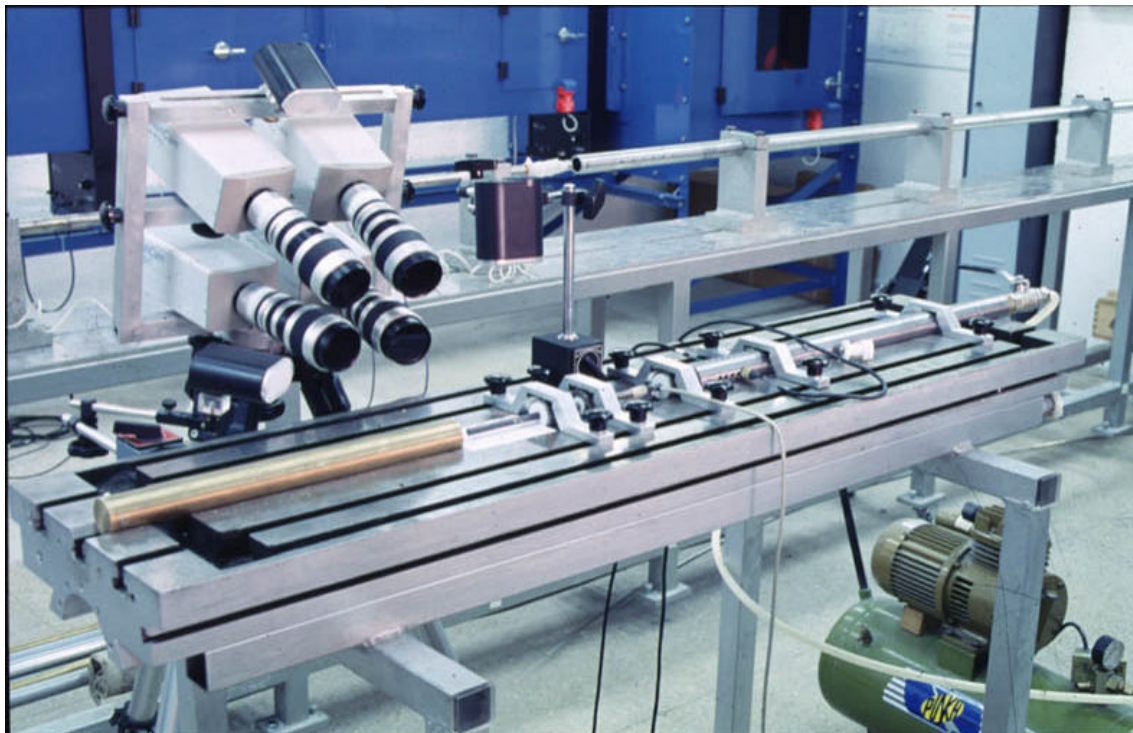


Figura 3.19. Bancada experimental de ensayos de "Spalling"

La barra incidente tiene una longitud de 200 mm y un diámetro de 8 mm. La barra utilizada, fabricada en acero de alto límite elástico, fue instrumentada en su mitad mediante bandas extensométricas modelo CEA-08-032UW-350, fabricadas por Micro-Measurements Group con objeto de medir sus deformaciones, y a través de ellas determinar el pulso de compresión comunicado a la probeta. La barra se encuentra soportada por los casquillos previamente descritos, uno de los cuales comparte con la probeta. De esta forma se asegura la correcta alineación barra-probeta y un buen contacto entre ambas, como puede apreciarse en la Figura 3.20.

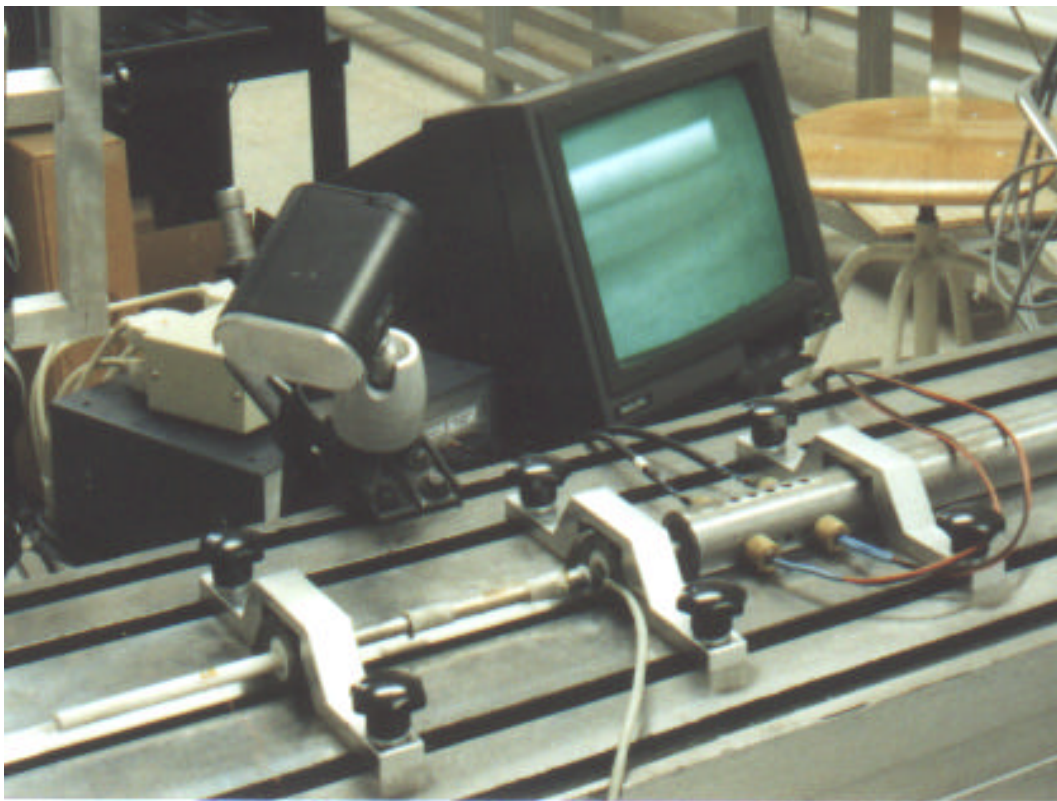


Figura 3.20. Detalle de la bancada experimental de ensayos de "Spalling".

El pulso de compresión generado tiene una duración y magnitud determinadas por la longitud y la velocidad de impacto del proyectil respectivamente. La duración se determina a través de la expresión (3-18) y la magnitud con (3-19). Por ello, para poder controlar la duración de la carga aplicada, se ha recurrido al empleo de un juego de proyectiles cuya longitud varía entre 15 y 26 mm. Este pulso se registra en la instrumentación de la barra, recogiendo su magnitud y evolución con el tiempo. La magnitud del pulso se controla mediante la modificación de la velocidad de impacto, gobernada por la presión de alimentación del compresor.

Por el interior del cañón desliza un casquillo de teflón que soporta el proyectil. De esta forma, al ser el proyectil subcalibrado (el diámetro del cañón es más grande que el del proyectil) se consiguen mayores aceleraciones y, por tanto, la longitud del cañón necesaria es mucho menor. El casquillo, representado en la Figura 3.21, fue diseñado para que al producirse la brusca deceleración del conjunto proyectil-casquillo, este último no se rompiera por su propia inercia. Para ello fue construido en dos piezas, una a modo de tubo y otra a modo de tapón que se separan en el momento del impacto. Además, para que las ondas generadas en el impacto no se vieran afectadas por el hecho de introducir el uso del casquillo, en el extremo del proyectil opuesto al impacto fue necesario alojar un disco de goma que separara el tapón del proyectil. La goma presenta una impedancia mucho menor que el acero y, por tanto, la carga comunicada por el proyectil al tapón es prácticamente despreciable en comparación con las cargas generadas en el proyectil. De esta manera se consiguen evitar posibles roturas en el casquillo de teflón.

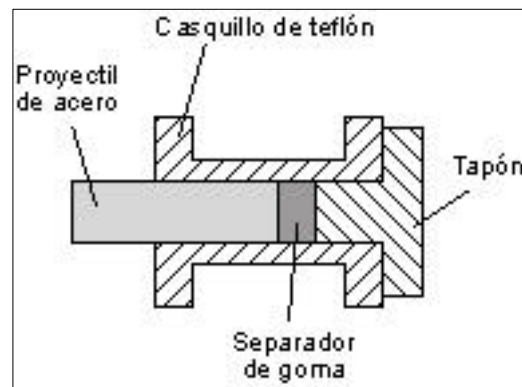


Figura 3.21. Geometría del conjunto casquillo-proyectil.

Cuando la probeta rompe, lo hace de forma que los fragmentos producidos salen a velocidades próximas a la de impacto del proyectil y en el sentido de avance de éste. Por ello el banco de ensayos se completa con un sistema de recogida de fragmentos. Este sistema consiste en un tubo relleno de espuma expandida, que frena suavemente los fragmentos de la probeta que ha roto, quedando alojados en su interior.

El dispositivo experimental dispone de un sistema de adquisición de datos formado por diferentes equipos. En el empleo de bandas extensométricas se ha recurrido al uso de un acondicionador de señal modelo Vishay 2200. La captura de datos se realizó con un osciloscopio digital modelo Tektronix 2214, cuya conexión a un ordenador portátil permite el tratamiento y almacenamiento de datos.

La información recogida se complementa con fotografías de alta velocidad. Se recurrió al empleo de cuatro cámaras digitales fabricadas por PCO Computer Optics modelo FlashCam. Fue necesario diseñar un sistema de conexión, iluminación y sincronismo de disparo para acoplarlo al ensayo, y por su complejidad se describe más adelante. Mediante el uso de estas

cámaras es posible obtener la posición de la primera fisura y realizar un seguimiento del proceso de rotura del material.

3.6.3 Análisis del proceso.

La onda de compresión generada en el impacto se desplaza primero por la barra incidente, transmitiéndose después a la probeta. Seguidamente alcanza el extremo libre de ésta, produciéndose su reflexión y con ello un cambio de dirección y de signo, pasando de compresión a tracción. Este cambio de compresión a tracción no ocurre de una forma brusca, sino que las tensiones de compresión van disminuyendo paulatinamente hasta dar lugar a un aumento de las tensiones de tracción. Por tanto, el pulso de tracción que aparece en la probeta va creciendo hasta alcanzar el valor de la resistencia a tracción del material. Este instante es el momento en el cual la probeta rompe.

Este proceso de reflexión de ondas de tensión, descrito anteriormente en el apartado 3.2 por la ecuación de ondas y representado en la Figura 3.2, puede calcularse mediante la superposición de dos ondas que se desplazan en el espacio sin variar su perfil. La primera, de compresión, es una onda que avanza por la probeta y que cuando llega al extremo libre sigue supuestamente avanzando más allá por el espacio en la misma dirección. La otra onda es igual pero de signo contrario, de tracción, y viene en dirección opuesta desde el espacio hacia la probeta. De esta forma, ambas ondas se encuentran en el extremo de la probeta y posteriormente se superponen. La suma de ambas ondas de tensión nos da el estado tensional real en la probeta, y puede comprobarse que el valor de tensiones en el extremo resulta nulo tal y como era de esperar. Este proceso se esquematiza en la Figura 3.22.

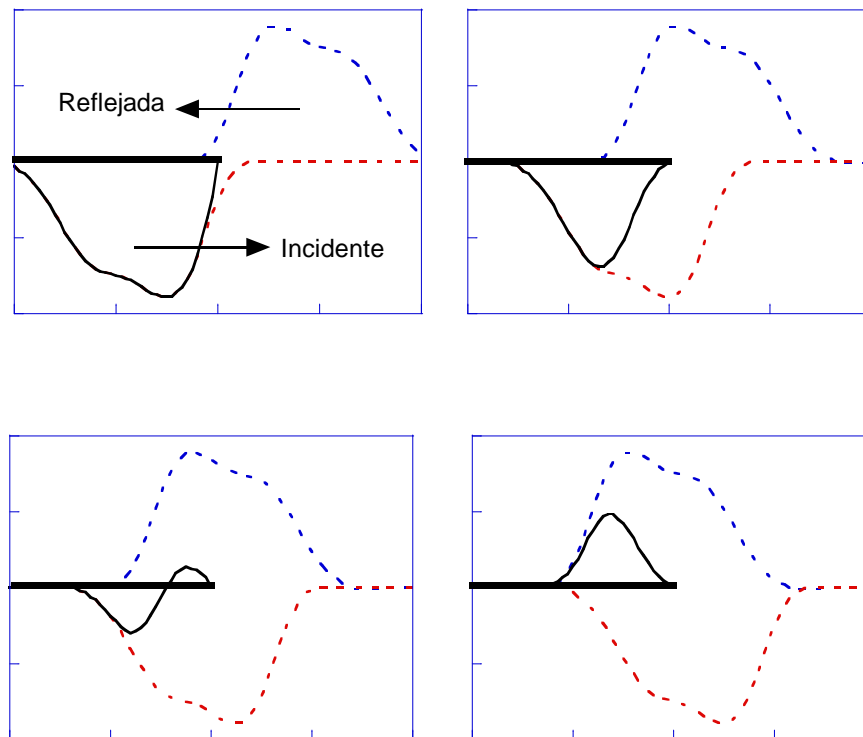


Figura 3.22. Reflexión de una onda de compresión y su cambio a tracción en el extremo libre de un ensayo de "Spalling".

Mediante la instrumentación de la probeta se registra el pulso de compresión comunicado. A continuación se produce la reflexión de este pulso y su cambio a tracción, generando la rotura del material. El tramo de pulso de tracción que ha sobrepasado el lugar en el que se ha producido la rotura continúa viajando a lo largo de la probeta y su magnitud se recoge también en la instrumentación. Un ejemplo de uno de estos registros se representa en la Figura 3.23. El tramo del pulso de tracción que no ha sobrepasado el lugar de la rotura queda atrapado en esa parte de la probeta sin producir efecto alguno en el registro recogido con la instrumentación. En principio el valor del máximo del pulso de tracción registrado proporcionaría el valor aparente de la resistencia a tracción.

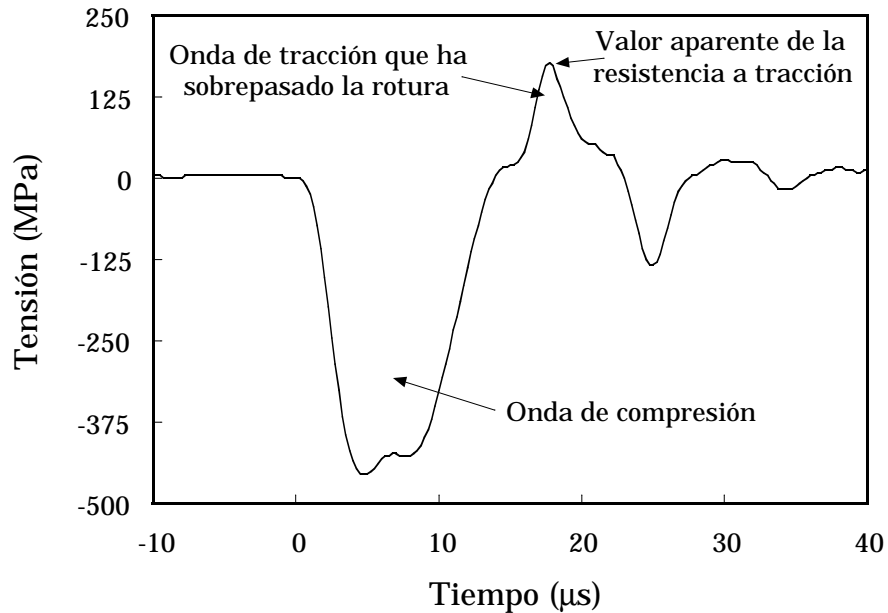


Figura 3.23. Registro de la instrumentación en la probeta.

Al continuar el material cargado, el fallo del material se extiende a otros puntos provocando confusión al determinar la posición de la rotura inicial. Por ello esta técnica está apoyada por una secuencia de fotografías ultrarrápidas que permite obtener el tiempo y la posición de cada rotura en el material, tal y como se aprecia en la Figura 3.24. Esto es muy importante, como se verá más adelante, y permite determinar el tiempo en el que se produce el fallo y localizar con exactitud la primera fisura.

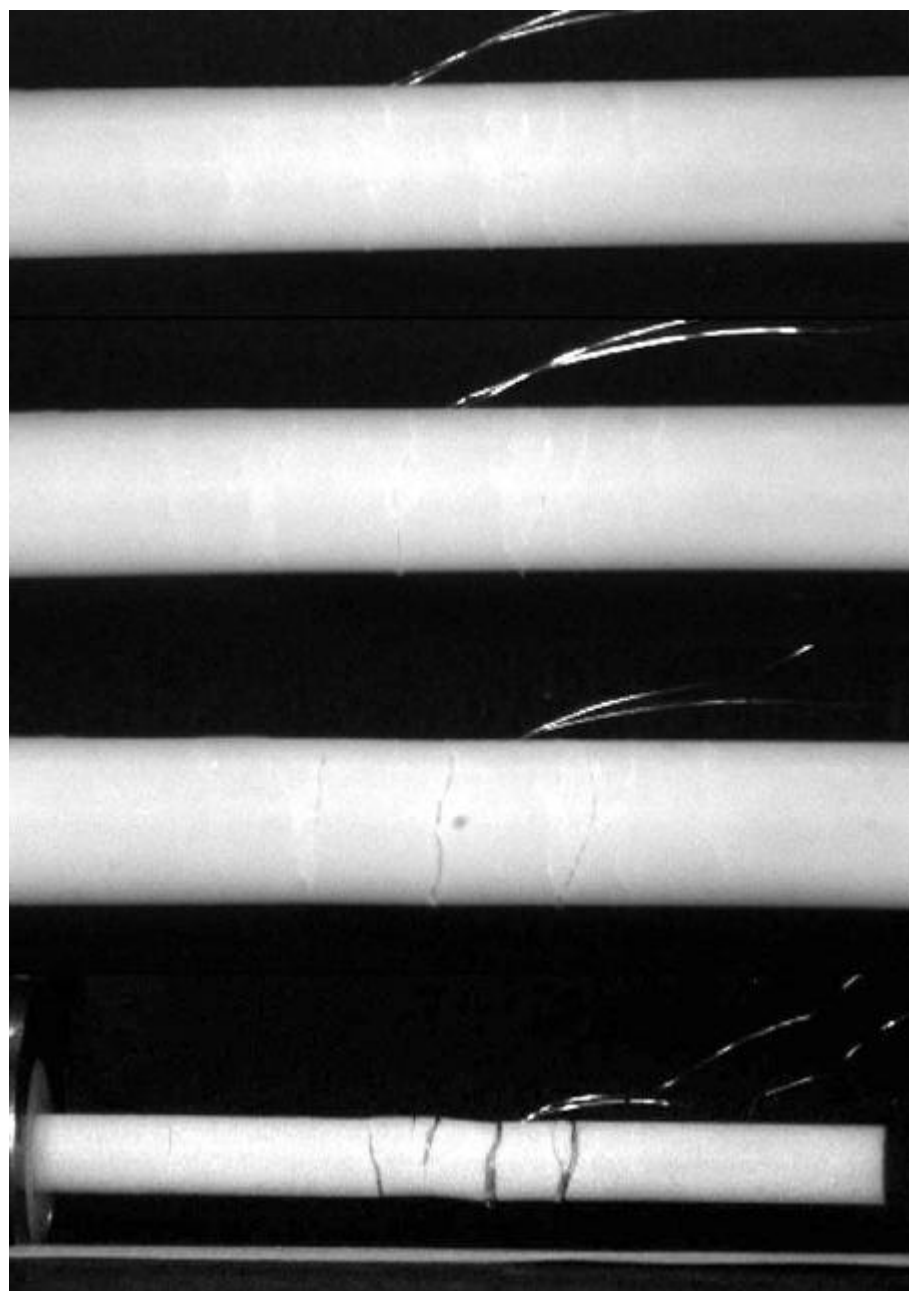


Figura 3.24. Secuencia de fotografías del ensayo SPA9906 realizado sobre Al_2O_3 99.5% tomadas 14, 17, 22 y 60 μs después de comenzar a cargar, con un tiempo de exposición de 1 μs .

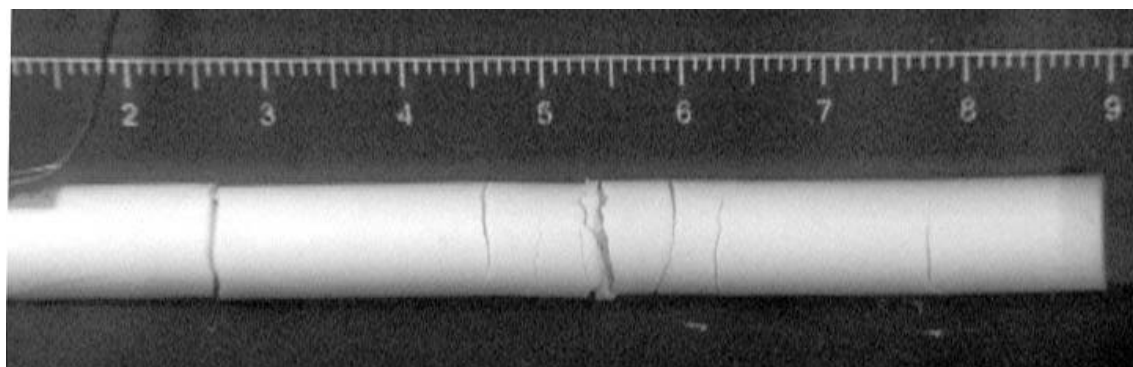


Figura 3.25. Fotografía de alta velocidad utilizada para obtener la posición de las roturas producidas durante un ensayo de spalling.

Al examinar las fotografías hay que tener en cuenta que las probetas pueden presentar ciertas marcas antes del ensayo procedentes de la textura de la superficie y de restos del pegamento utilizado al colocar las bandas extensométricas. Estas marcas pueden confundir y parecer que son roturas, por lo que es importante tomar una fotografía más retardada en el tiempo o recoger los fragmentos al final y examinarlos con detalle de forma que pueda localizarse la sección donde se produjo la rotura inicial.

Si se admite que la resistencia a tracción se puede determinar a través del valor máximo del pulso de tracción que ha sobrepasado la rotura, como el mostrado en la Figura 3.23, los valores que se obtienen son demasiado bajos al compararlos con los resultados de los ensayos de compresión diametral. Los valores medios obtenidos en alúminas fueron aproximadamente la mitad, mientras que en los carburos la diferencia fue aún mayor. Esto hizo suponer que este procedimiento para determinar la resistencia a tracción no es adecuado, siendo necesaria alguna modificación. En la Figura 3.26 se muestran las medidas que proporciona el valor del pulso de tracción en la instrumentación de las probetas frente a los resultados de los ensayos de compresión diametral realizados en algunos de los materiales estudiados.

Para analizar el efecto del corte de la onda de tracción producido por la rotura se decidió instrumentar las probetas en varias posiciones distintas. Con ello se detectó que este pulso de tracción se atenúa de una forma apreciable al recorrer la distancia que separa la rotura de la posición de medida dada por la banda extensométrica. En la Figura 3.27 se muestra un registro obtenido en una probeta instrumentada en dos posiciones. En ella se aprecia que en la instrumentación más alejada de la posición de rotura, el valor del pulso de tracción es menor que en la posición más cercana a la rotura. En consecuencia, el procedimiento de determinación de la resistencia a tracción a través de la máxima tensión de tracción registrada por la instrumentación no parece muy apropiado.

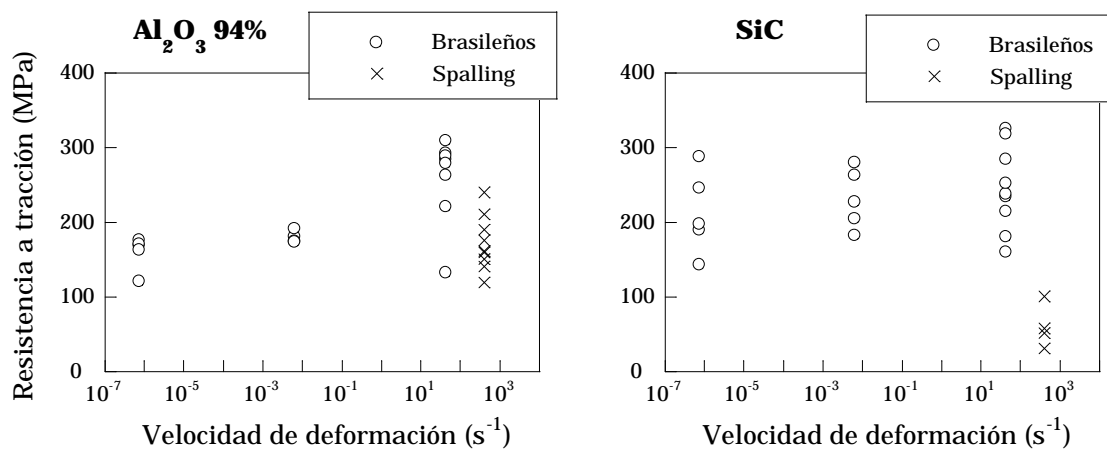


Figura 3.26. Resultados comparativos entre la resistencia a tracción medida en los ensayos de compresión diametral realizados y los valores del máximo de tracción que proporciona la instrumentación de la probeta

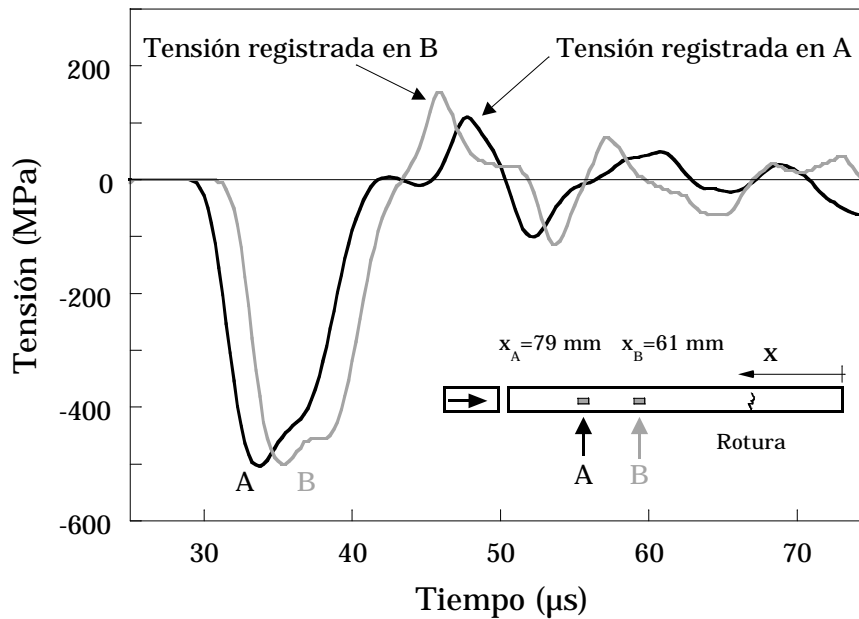


Figura 3.27. Registros obtenidos en un ensayo instrumentado en dos posiciones distintas. Se observa la disminución de la magnitud del pulso de tracción según evoluciona en la probeta.

Para comprobar que la aparición de este efecto no es consecuencia de un mal funcionamiento del equipo experimental se realizó una modelización numérica del ensayo.

Se ha utilizado código comercial Autodyn 2D, comercializado por Century Dynamics. Es un programa de cálculo numérico basado en el método de las diferencias finitas y especializado en problemas dinámicos. La versión utilizada fue la 2D que sirve para cálculos bidimensionales aunque tiene las opciones de simetría axial y deformación uniaxial.

La geometría modelizada fue exactamente la misma que la geometría real, 100 mm de longitud por 8 mm de diámetro, aprovechando las ventajas de este código 2D al poder emplear simetrías de revolución.

Como condición de contorno se aplicó en la primera de las caras planas de la probeta el registro de tensiones de compresión que se había medido en la barra de acero mediante las bandas extensométricas, corregido por el coeficiente de transmisión de ondas elásticas entre dos medios de diferente impedancia. El registro de compresión modelizado fue el correspondiente al ensayo SPA9906 que puede consultarse en el apéndice de ensayos.

El modelo de material utilizado, que se resume en la Tabla 3.4, fue elástico y lineal con rotura cuando la tensión principal alcanza un valor límite. Durante la simulación se comprobó que las tensiones principales coincidían en todo instante con el eje longitudinal de la probeta y su normal. Por tanto los ejes principales coinciden en todo momento con los ejes de simetría del problema. Las propiedades del material utilizadas en la simulación

Tabla 3.4. Propiedades de los materiales empleadas en la modelización numérica del ensayo.

| <i>Material Cerámico</i> | |
|--------------------------------------|---------------------------------|
| <i>Ecuación constitutiva</i> | <i>Elástico Lineal</i> |
| <i>Densidad</i> | <i>3840 Kg/m³</i> |
| <i>Módulo de elasticidad</i> | <i>360 GPa</i> |
| <i>Módulo de rigidez transversal</i> | <i>150 GPa</i> |
| <i>Criterio de fallo</i> | <i>Tensión principal máxima</i> |
| <i>Tensión de tracción máxima</i> | <i>220 MPa</i> |

Durante las simulaciones se registraron la historia de tensiones en diferentes puntos a lo largo del cilindro, incluyendo entre ellos la misma posición en que se instrumentaron las probetas. De las simulaciones también se obtuvo el instante en que se produce la rotura.

En la simulación numérica del ensayo se confirma que la parte del pulso de tracción que queda después de la rotura va decreciendo según viaja a lo largo de la probeta. Por este motivo, al registrar las tensiones durante el ensayo mediante una banda extensométrica en una posición alejada de la posición de rotura, se tiene un valor del pulso menor que la resistencia a tracción del material, y la lectura será tanto menor según nos alejemos de la posición de rotura.

En la Figura 3.28 se reproducen los resultados de la simulación numérica realizada, representando el perfil de tensiones de tracción presente en la probeta en diferentes instantes. En la figura se aprecia como el pulso de tracción va aumentando hasta llegar al valor de la resistencia a tracción, momento en que el material falla. A continuación se ve como el pulso decrece según se aleja de la posición de rotura, desplazándose por el material.

Al examinar los valores de tensión máximos en el momento de la rotura y en la posición de medida, se aprecia que la rotura se produce, como es de esperar, cuando las tensiones de tracción alcanzan el valor de la resistencia a tracción. Sin embargo en posiciones más alejadas, en las que se encuentran las bandas, se obtiene un valor claramente inferior. En la posición de la instrumentación de la probeta se registró un máximo de tensiones de tracción de 165 MPa, mientras que la simulación proporciona en ese punto un valor de 170 MPa. Este valor es menor cuanto más distante sea su posición de medida de la rotura. La medida obtenida por la

instrumentación del ensayo es por tanto menor que la resistencia a tracción del material.

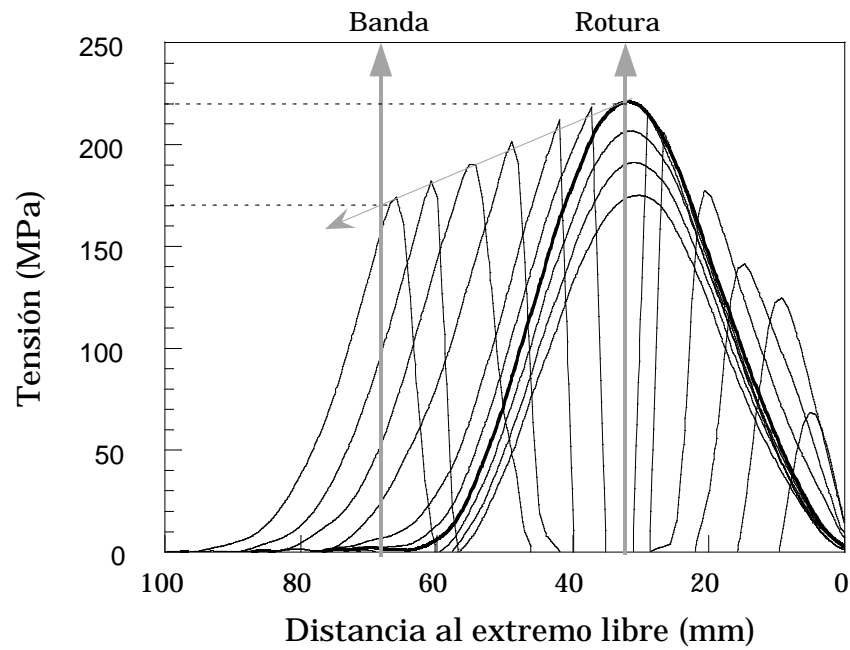


Figura 3.28. Modelización numérica del ensayo. Atenuamiento del pulso de tracción producido por la rotura de la probeta.

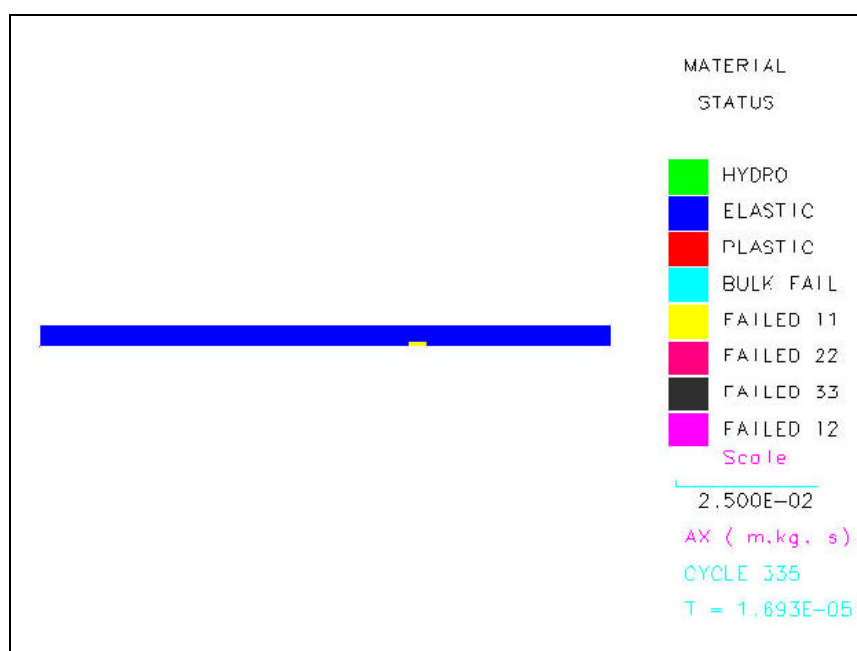


Figura 3.29. Imagen 16.9 μs después de comenzar a cargar la probeta, instante en el que se produce la rotura.

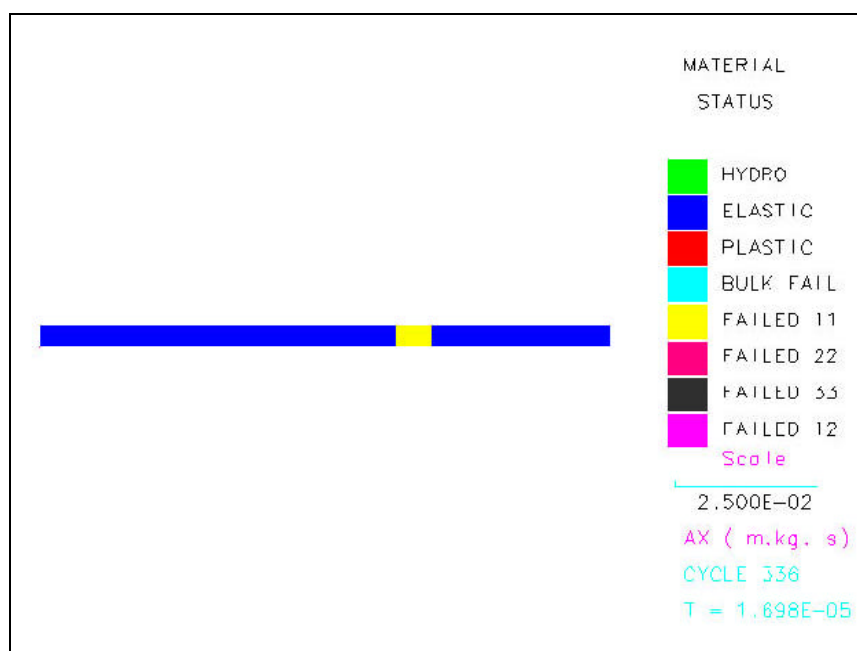


Figura 3.30. Instantánea de la misma simulación a los 17.0 μs .

De los resultados de esta simulación se concluye que el material rompe en el mismo punto que se aprecia en las fotografías de alta velocidad, en este caso a 32 mm del extremo libre. Además, la simulación reproduce fielmente las lecturas de las bandas extensométricas de la probeta. Por tanto, el modelo numérico reproduce con precisión el lugar en el que se produce de rotura del ensayo y las medidas que de él se obtienen.

La primera imagen en la que se detecta la rotura de la probeta (Figura 3.24) corresponde a los 17 μ s después de comenzar a cargar la probeta, mientras que en la fotografía anterior, a los 14 μ s, no se apreciaba rotura alguna. Por tanto la probeta se fisura entre ambos instantes, con un error menor de 1 μ s, que es el tiempo de exposición de las fotografías. En la simulación la probeta rompe a los 16.9 μ s, instante que se refleja en la Figura 3.29, y se extiende rápidamente según se aprecia en la Figura 3.30 (17.0 μ s). Ambos instantes están entre los tiempos en que se han obtenido las fotografías de los ensayos. En consecuencia, se puede afirmar que el modelo numérico reproduce también con suficiente precisión el momento en el que se produce el fallo en el material durante el ensayo.

El cálculo numérico es capaz de simular con éxito la posición y el instante del fallo del material, y reproducir las medidas obtenidas mediante la extensometría. Sin embargo, la resistencia a tracción no puede obtenerse del valor del pulso de tracción registrado por la banda extensométrica, pues ésta registra un valor inferior debido a la atenuación del pulso. Por tanto fue necesario una modificación del método de cálculo que proporciona la resistencia a tracción, basándose en las medidas proporcionadas por la instrumentación.

Una explicación de este efecto no es trivial. Al producirse la rotura se forma una superficie libre irregular de manera muy rápida, haciendo los efectos

tridimensionales sean apreciables. En la simulación se ha comprobado que antes de la rotura las tensiones en direcciones normales al eje de la probeta son muy bajas, pero inmediatamente después aumentan de valor. Puesto que el material se comporta de forma elástica, la energía elástica se ha de conservar, por lo que las tensiones en dirección del eje de la probeta deben disminuir.

Durante los ensayos preliminares se detectó otro efecto adicional. Mientras que las alúminas presentaban una única rotura inicial, en los carburos apareció una multifisuración prácticamente simultánea con resultados especialmente bajos. En la Figura 3.31 se muestra una fotografía de un ensayo de carburo de boro tomada con 1 μ s de exposición a los 9 μ s de aplicar la carga a la probeta. En ella se aprecian con detalle varias fisuras, mientras que la fotografía tomada 3 μ s antes no presentaba ninguna.

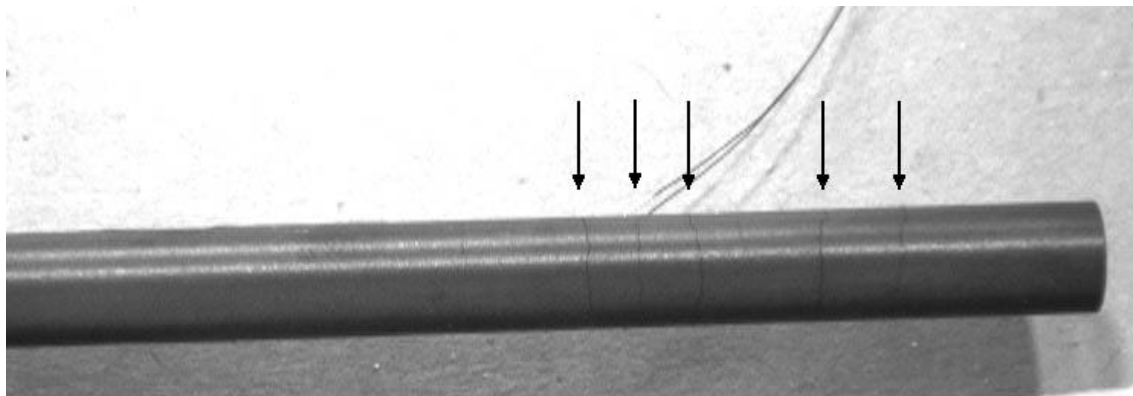


Figura 3.31. Fotografía de un ensayo realizado en carburo de boro. Se aprecia la aparición simultánea de varias fisuras produciendo un efecto de multifisuración.

Para comprender cual es el motivo de la aparición de esta multifisuración hay que entrar un poco más en el detalle en como se produce la reflexión en un extremo libre de una onda elástica de tensión. La reflexión de una onda elástica que viaja por una barra puede reproducirse superponiendo esta onda con una igual y de signo contrario que supuestamente venga en dirección contraria. Si a una onda de compresión que llega a un extremo libre, se le suma en cada instante otra idéntica de tracción que viene en dirección contraria se obtendrá el estado de tensiones en la barra en cada instante. Véase la Figura 3.22.

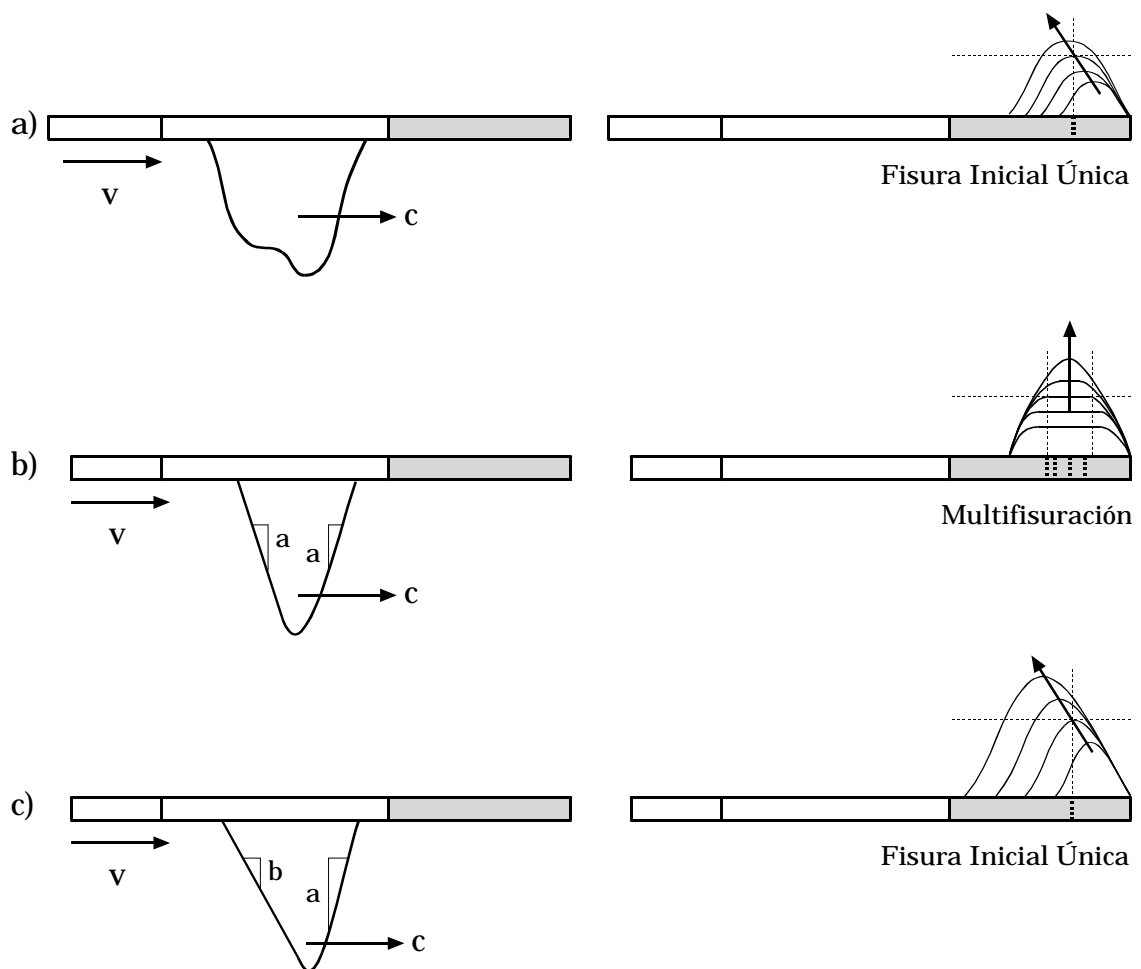


Figura 3.32. Reflexión de una onda en un extremo libre. Dependencia del perfil del pulso en la forma en que se produce la reflexión.

El pulso de compresión inicial es conocido al registrarse mediante la instrumentación de la probeta y de la barra de carga. En un ensayo realizado sobre alúmina con un proyectil cilíndrico de 26 mm de longitud, el pulso de compresión es tal y como se reproduce en el caso "a" de la Figura 3.32. Si se supone que no se producirán roturas, mediante un sencillo cálculo puede determinarse como evoluciona el valor de las tensiones de tracción presentes en la probeta, y en qué lugar está el máximo de ellas en cada instante. La evolución de las tracciones presenta un aumento con un máximo acusado desplazándose sobre la probeta. Cuando este máximo alcanza la resistencia a tracción la probeta rompe. Según esto, es posible llegar a una relación entre la posición y el máximo de las tracciones, conociendo además el tiempo en que esto ocurre.

Cuando se ensayaron carburos, puesto que la velocidad de propagación de las ondas es mayor que en las alúminas, fue necesario recortar la longitud del proyectil para conseguir ondas de compresión de menor duración con el objeto de evitar que se produzcan efectos de superposición de ondas sobre la probeta. Al reducir la longitud del proyectil se encontró la multifisuración. Con una longitud de proyectil de 20 mm, el pulso generado cambia y su forma se aproxima a un pulso triangular. Éste se representa como caso "b" en la Figura 3.32. Ahora, la reflexión de este pulso en el extremo libre produce un efecto de meseta, en el cual el pulso crece sin presentar un único máximo sino una zona plana. Esto produce la multifisuración observada en los carburos y no permite asignar un valor de tensión a cada rotura, evitando que pueda obtenerse una relación entre el máximo del pulso de tracción en la reflexión y la posición.

Si se analiza ahora el caso "c" de la Figura 3.32, es decir, un pulso triangular, con diferentes pendientes de subida y bajada, se observa que la reflexión es muy distinta. Ya no aparece la mencionada meseta, sino que el

máximo de las tensiones de tracción es único y se desplaza sobre la probeta como en el caso a). Al introducir este pulso en la probeta, se produciría una única fisura inicial y además existiría una relación entre la posición de la primera rotura y el máximo de la tracción. Por tanto, la obtención de este tipo de pulso triangular de diferentes pendientes evitaría la multifisuración, proporcionando una relación inequívoca entre la posición de la rotura y el nivel de tensión que la provoca.

La obtención de este tipo de pulso no fue un problema sencillo. Para producir un pulso triangular de diferentes pendientes es importante conocer porque se producen estas pendientes. En un caso ideal, el impacto de un cilindro contra una barra semi-infinita produciría un pulso rectangular. La pendiente de subida se produce por el impacto inicial, que en un caso ideal es instantáneo. En un caso real el material presenta una cierta rugosidad y el impacto siempre tiene un pequeño desalineamiento que implica que el tiempo de subida del pulso real tenga una cierta pendiente de subida. Esta pendiente no se puede controlar con facilidad, pues varía en cada caso según el contacto producido en el impacto. En cambio, la pendiente de bajada es producto de la reflexión de la pendiente de subida sobre el extremo posterior del proyectil. Mientras esta reflexión se produzca en una superficie plana, la pendiente de bajada será igual que la pendiente de subida. En cambio, si modificamos esta superficie, las pendientes serán diferentes.

Para conseguir este efecto se construyeron proyectiles con un chaflán en su extremo posterior, como se aprecia en la Figura 3.33. Ahora la reflexión de las ondas hace que el pulso generado sea de forma triangular con pendientes diferentes. El resultado sería el mencionado en la Figura 3.32 como caso "c", evitando la multifisuración del material y proporcionando una relación entre la posición de la rotura y el máximo de la tensión que la produce. Este tipo

de proyectil fue el empleado al ensayar los carburos dando excelentes resultados.

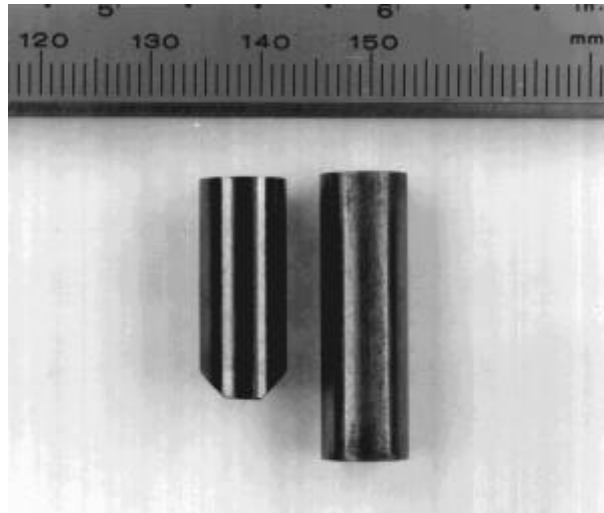


Figura 3.33. Fotografía de los diferentes proyectiles empleados. Proyectiles cilíndricos y proyectil modificado con chaflán.

3.6.4 Procedimiento de cálculo de la resistencia a tracción.

Se ha visto que, mediante el pulso adecuado, es posible llegar a una relación entre la posición de la primera fisura y el valor de la tensión que la provoca. En consecuencia, conociendo la posición de la primera rotura del material, puede obtenerse el valor de la tensión máxima en el material y el instante en que esto ocurre, siendo entonces esa tensión la resistencia a tracción del material.

Realizando un simple cálculo elástico de superposición de ondas y suponiendo que no existe rotura, puede obtenerse la evolución del perfil de tensiones de tracción durante la reflexión y seguir el crecimiento del máximo relacionándolo con la posición, para determinar la resistencia a

tracción del material. En la Figura 3.34 se muestra la evolución del perfil de tensiones de tracción que aparecen en la probeta con el tiempo. Se muestran los perfiles de tensión determinados a través de un calculo analítico de la reflexión de la onda de compresión generada en un ensayo, desde el momento en que aparecen tensiones de tracción y cada $0.25 \mu\text{s}$. La posición en que se produce la rotura, determinada con las fotografías de alta velocidad, se corresponde con un perfil de tensiones que presenta un máximo en ese punto. La curva que presenta un máximo en la posición de la rotura es el estado tensional en ese instante. Por tanto, el máximo de esa curva será la resistencia a tracción del material. Este valor es efectivamente mayor que el registrado por la banda, que está marcado con línea discontinua en el gráfico. Gracias a esta relación entre la posición y el máximo de las tensiones de tracción, la determinación del lugar de la primera fisura proporciona la resistencia a tracción del material.

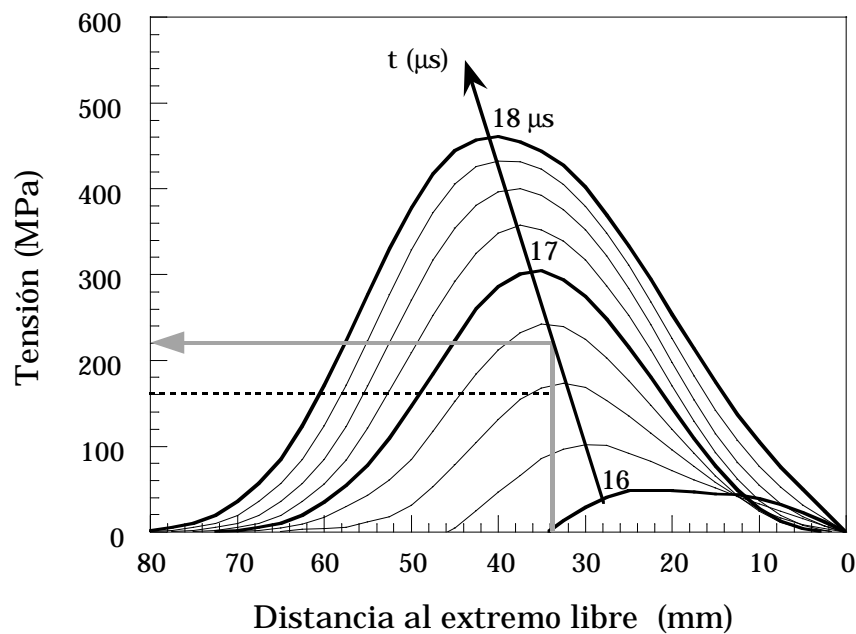


Figura 3.34. Crecimiento teórico del pulso de tracción sin rotura para determinar la resistencia a tracción de la probeta.

Este procedimiento de cálculo puede realizarse con un simple programa de ordenador. El dato de partida necesario es el perfil de la onda de compresión introducida en la probeta. El resultado final es la resistencia a tracción del material, y el instante en que el material rompe. La posición de la rotura ha de medirse en la fotografía.

En definitiva, es importante que el pulso de compresión generado en el impacto tenga unas ciertas características para que se produzca una variación de la posición del máximo a lo largo del tiempo durante la reflexión. Esto evita la multifisuración y produce una fisura inicial única, que es una de las hipótesis necesarias que debe cumplir el ensayo.

Los ensayos de alúminas se realizaron con proyectiles cilíndricos de 24 mm y 26 mm, mientras que para ensayar los carburos se utilizó el proyectil modificado de 20 mm de longitud. Los resultados de todos los ensayos de "spalling" se presentan en el siguiente capítulo de esta Tesis.

Antes de realizar el ensayo podemos conocer el pulso de compresión de partida. Solo es necesario impactar con el proyectil sobre la barra de acero sin probeta. Con ello somos capaces de predecir la evolución de las tensiones en la probeta. Por consiguiente, sabremos con antelación la zona en que se va a producir la rotura y en qué tiempo va a ocurrir con un pequeño margen de error, lo que permite ajustar los puntos y tiempos en los que se toman las fotografías. Una vez realizado el ensayo, midiendo con precisión la posición exacta de la rotura se determina el instante en que ha roto y se obtiene la resistencia a tracción del material.

Este método es un procedimiento fiable que ha permitido obtener la verdadera resistencia a tracción uniaxial de materiales cerámicos. La realización de ensayos de "spalling" tiene claras ventajas respecto a otros

tipos de ensayos, como los ensayos brasileños o los de flexión en tres puntos, para determinar la resistencia a tracción de un material cerámico. Es evidente que el material está sometido a un estado uniaxial de tensión, por lo que la máxima tensión de tracción medida corresponde a la verdadera resistencia a tracción del material, lo que no sucede en otros tipos de ensayos.

Por otro lado, los ensayos de "spalling" tienen dos inconvenientes que deben considerarse: en primer lugar sólo es posible realizarlos a altas velocidades de deformación. En segundo lugar, el material ha estado previamente sometido a cargas de compresión que podrían producir algún daño en el material y rebajar su resistencia antes de ser sometido a las cargas de tracción. Aún así, en los ensayos presentados, todas las tensiones de compresión generadas estuvieron siempre por debajo del 25% de la resistencia a compresión del material, con lo que es razonable suponer que el material no ha sufrido ningún daño previo.

La técnica desarrollada exige de unos equipos sofisticados para la adquisición de datos y de imágenes fotográficas y una larga preparación de los ensayos si se instrumentan la totalidad de probetas a ensayar. Sin embargo, el procedimiento podría simplificarse.

En los ensayos la carga aplicada a la probeta se recoge a través de la instrumentación de la misma. Sin embargo, es posible determinar la onda de compresión de carga mediante la instrumentación de la barra de acero con la que transferimos la carga a la probeta. Esto puede hacerse componiendo la onda incidente y la onda reflejada registradas en la barra, proporcionando la onda transmitida a la probeta. También puede determinarse la onda transmitida a la probeta a través del coeficiente de transmisión de ondas, siempre que el contacto barra-probeta sea

suficientemente bueno. De esta forma se puede evitar la instrumentación directa de las probetas. De hecho, algunos de los ensayos de esta Tesis se han realizado con probetas sin instrumentar.

Dependiendo de los materiales a ensayar y de las condiciones del pulso inicial conseguido, puede ser posible evitar que durante el ensayo se produzcan fisuras secundarias posteriores a la fisura inicial y llegar a obtener una única fractura. Esto implicaría que en estos casos es posible prescindir de las técnicas de fotografía. Prescindir de las técnicas de fotografía ultrarrápida sólo sería posible en aquellos materiales que presenten una única fisura. Pero para extender el empleo a mayor cantidad de materiales, y en concreto a los estudiados en esta Tesis, es imprescindible la fotografía.

3.7 Excitación por impulsos.

Para determinar el módulo de elasticidad en condiciones dinámicas se recurrió a ensayar las probetas mediante la técnica de excitación por impulsos. Esta es una técnica no destructiva que no produce ningún daño a las probetas ensayadas.

El procedimiento consiste en excitar la probeta mediante un impulso mecánico exterior y analizar sus modos de vibración naturales durante la relajación de la muestra. Mediante el análisis de estas vibraciones se obtiene el módulo elástico del material.

La probeta se coloca apoyada en dos puntos según se muestra en la Figura 3.35 y mediante una pequeña percusión en su centro comienza a vibrar. La frecuencia emitida por esta vibración, correspondiente a uno de sus modos naturales, se escucha mediante un micrófono y a través de un sistema de tratamiento de datos se determina su frecuencia que proporciona el módulo de elasticidad del material.

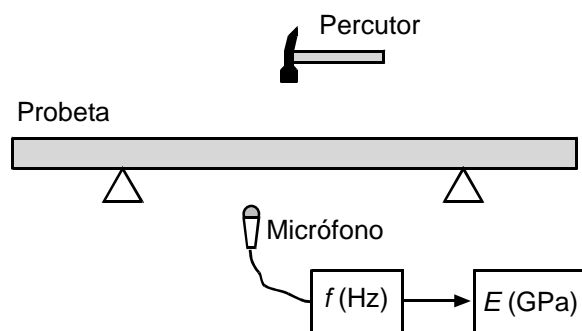


Figura 3.35. Esquema del procedimiento de medida del módulo elástico mediante la técnica de excitación por impulsos.

El equipo utilizado fue un GrindoSonic MK5. Las probetas ensayadas fueron las mismas que posteriormente se ensayaron mediante la técnica de Spalling, cilindros de 100 mm de longitud y 8 mm de diámetro

Los resultados de los ensayos se muestran en el siguiente capítulo.

3.8 Fotografía de alta velocidad.

La utilización de la fotografía de alta velocidad tiene diferentes objetivos según el tipo de ensayo que se realiza. En cualquier caso, el fin de la misma es analizar la validez de los ensayos y tratar de determinar la posición donde se origina el fallo en el material.

En los ensayos brasileños, recordamos que la probeta se carga mediante dos apoyos cerámicos con el objeto de que la aplicación de las cargas sea lo más puntual posible. Después de los ensayos, estos apoyos se encuentran totalmente rotos, al igual que la probeta. Si se quiere que la carga máxima registrada en el sistema de adquisición de datos corresponda a la rotura de la probeta, hay que comprobar que la probeta rompe antes que los apoyos. También se ha de comprobar que el material objeto del estudio rompe por tracción, apareciendo la primera fisura a lo largo del diámetro de aplicación de las cargas, y no por compresión en las proximidades de los apoyos. Si la fractura ocurre en el diámetro mencionado, el ensayo es válido. Otro análisis interesante es el estudio de las roturas secundarias que se producen durante el proceso de carga. Todo esto se consigue gracias al empleo de la fotografía de alta velocidad.

En los ensayos de "spalling", las probetas rompen primero por una sección, y en la mayoría de los casos se fisuran posteriormente por diferentes secciones adicionales. Esto es debido a que la probeta sigue aún soportando ondas de tracción y compresión atrapadas en el seno del material, que al evolucionar pueden cambiar de signo y llegar a sumarse, superando el valor de la resistencia a tracción y producir roturas añadidas. Cuando se realiza el análisis de las probetas, sólo interesa conocer cuál es la primera rotura y donde se localiza. Para determinar cuál de las roturas es la inicial, es muy útil la fotografía de alta velocidad.

3.8.1 Sistema de adquisición de imágenes.

En los ensayos se usaron cuatro cámaras FlashCam de PCO Computer Optics. Mediante este montaje se pudieron obtener cuatro imágenes de cuatro instantes diferentes de la rotura. La disposición de las cámaras es en una matriz de 2 por 2 como se aprecia en la Figura 3.36. Estas cámaras tienen un sensor electrónico tipo CCD y se accionan por medio de un disparador electrónico con un retardo ajustable entre 1 μ s y 1 ms en pasos de 1 μ s. Los tiempos de exposición también se pueden graduar entre 1 μ s y 1 ms en pasos de 1 μ s. La salida de las cámaras es una salida analógica de vídeo TTL para su conexión a un monitor y una salida digital por puerto paralelo tipo Centronics que permite el volcado de las imágenes en un ordenador personal.

En los ensayos brasileños, al igual que en los de spalling, la señal que activa el disparo de las cámaras se obtuvo de la instrumentación en la barra de carga o barra incidente. El problema que surgió al utilizar este método es que las posteriores reflexiones de las ondas sobre esta barra podían volver a activar el sistema de disparo de las cámaras, tomando nuevas imágenes y en consecuencia eliminando las anteriores de la memoria de las cámaras. Para evitar esto fue necesario diseñar y construir un sistema basado en un circuito electrónico tipo biestable (flip-flop) que resuelve el problema. Este circuito cambia permanentemente de estado al llegar una señal de amplitud prefijada, con lo que se consigue que la electrónica de la cámara no vuelva a disparar hasta que se restablezca manualmente el estado inicial del circuito. El esquema del ensayo se representa en la Figura 3.37.

La señal procedente de este circuito se comunica al circuito de retardo que tienen las cámaras y se regula para que la fotografía se obtenga en el instante en el cual se prevé que se va a producir la rotura. Este tiempo se

obtiene según se especifica en la metodología de cada ensayo. El tiempo de exposición de las imágenes osciló entre 1 y 2 μs , dependiendo de los casos.

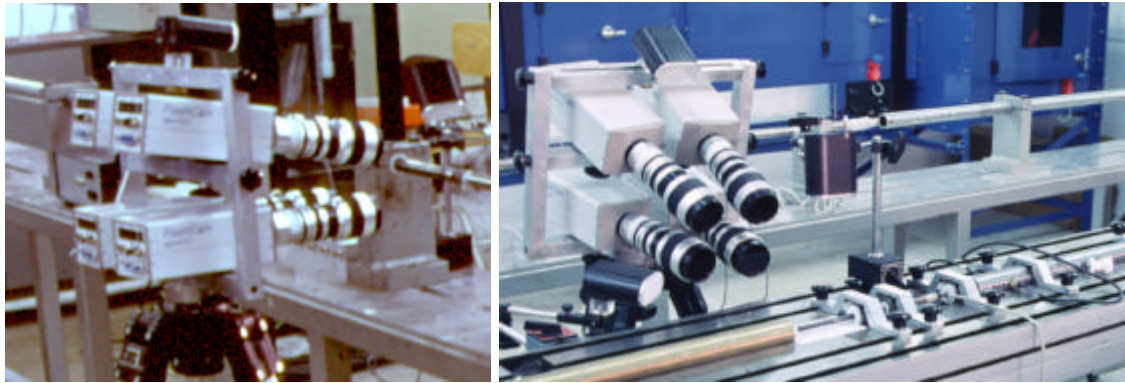


Figura 3.36. Disposición de las cámaras durante los ensayos de tracción por compresión diametral y de tracción directa por spalling.

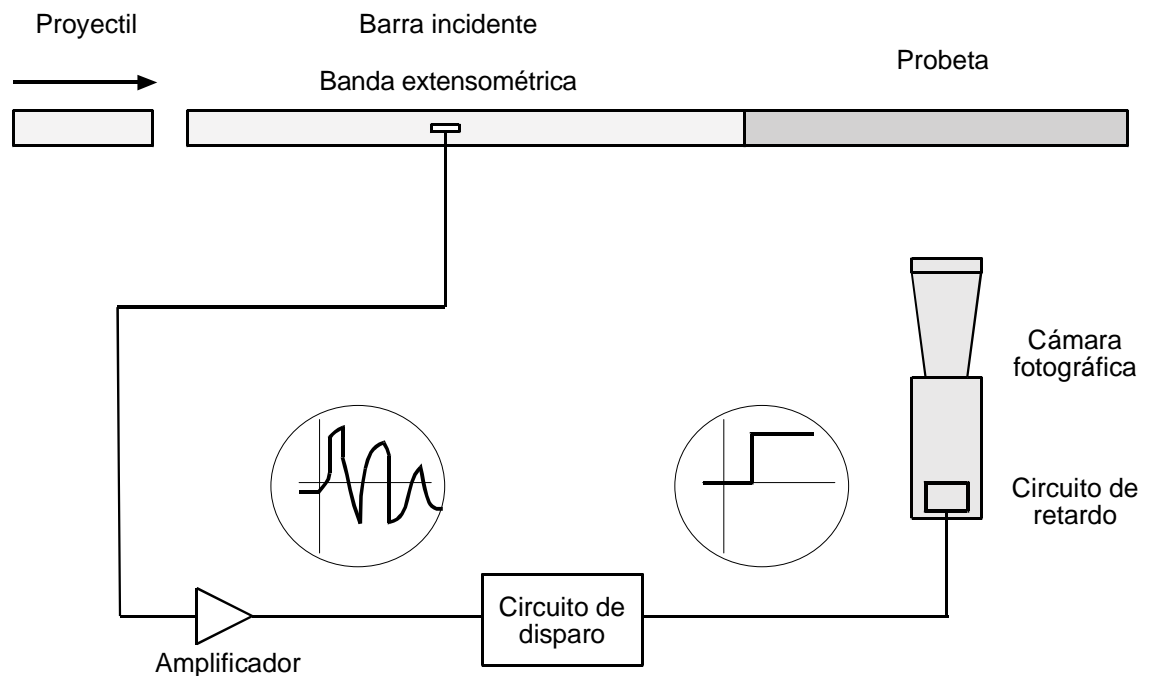


Figura 3.37. Esquema de conexión del sistema de disparo de las cámaras.

3.8.2 Sistema de iluminación.

Para obtener fotografías con la calidad necesaria, es necesario proporcionar una buena iluminación a la probeta. Además, puesto que hay zonas de las probetas que están en diferente plano focal que otras, es necesario que el diafragma del objetivo esté suficientemente cerrado para que el campo de profundidad asegure que toda la probeta está enfocada. Por ello, la iluminación ha de ser tal que permita cerrar el diafragma y obtener el efecto deseado.

La iluminación natural no tiene la suficiente intensidad para exponer las cámaras en tan corto tiempo. El empleo de potentes focos halógenos también se descartó por el calor que generan, el cual podría aumentar la temperatura de las probetas y alterar las medidas mediante bandas extensométricas con las que se registran las deformaciones. Por ello, para iluminar la probeta durante el ensayo, se recurrió a la utilización de flashes convencionales de fotografía tradicional. Este tipo de flashes está alimentado con pilas convencionales y su disparo se realiza mediante el cierre de dos contactos. Por tanto es necesario que un circuito electrónico externo realice esta operación partiendo de alguna señal externa. Para seleccionar el instante en que se realiza este cierre, es necesario conocer la curva de respuesta de los flashes, que se muestra en la Figura 3.38. En esta figura, en el gráfico de la derecha se representa la cantidad de luz que proporciona el flash en función del tiempo, y el de la izquierda una ampliación que demuestra que la cantidad de luz es prácticamente constante durante el tiempo que dura el ensayo.

En las curvas de respuesta se aprecia que la iluminación de los flashes dura 20 ms, durante los cuales la intensidad va decreciendo desde el máximo de iluminación hasta cero. En el detalle se aprecia que hasta 25 μ s después del

instante de disparo, los flashes no comienzan a iluminar, y la cantidad de luz no alcanza el 100% de su valor hasta transcurridos 85 μs . También es importante apreciar que durante el primer milisegundo el nivel de iluminación está aún por encima del 90% de su valor máximo.

Según lo anterior, es necesario que la señal de disparo de las cámaras se produzca al menos 100 μs antes del instante a fotografiar para asegurar la correcta iluminación de la probeta, disponiendo posteriormente de más de 1 ms de tiempo en que la cantidad de luz es suficiente. La señal de disparo no puede obtenerse de la instrumentación en la barra de acero, pues el tiempo en que la banda recibe la onda incidente y la probeta rompe es de unos 35 μs en el mejor de los casos, por lo que el flash aún no habría comenzado a iluminar. Por ello se ha recurrido a la utilización de células fotoeléctricas que detectan el paso del proyectil antes de producirse el impacto con la barra incidente, según se aprecia en la Figura 3.39.

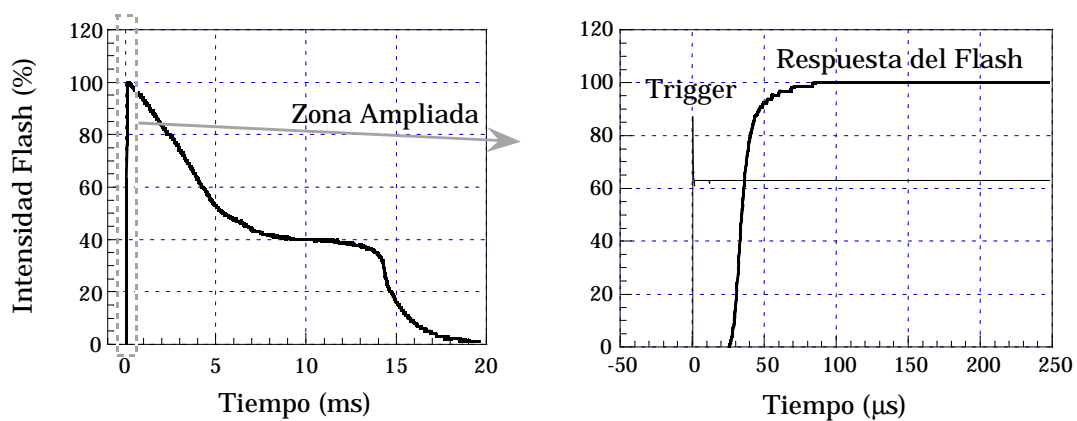


Figura 3.38. Tiempo de respuesta de los flashes utilizados.

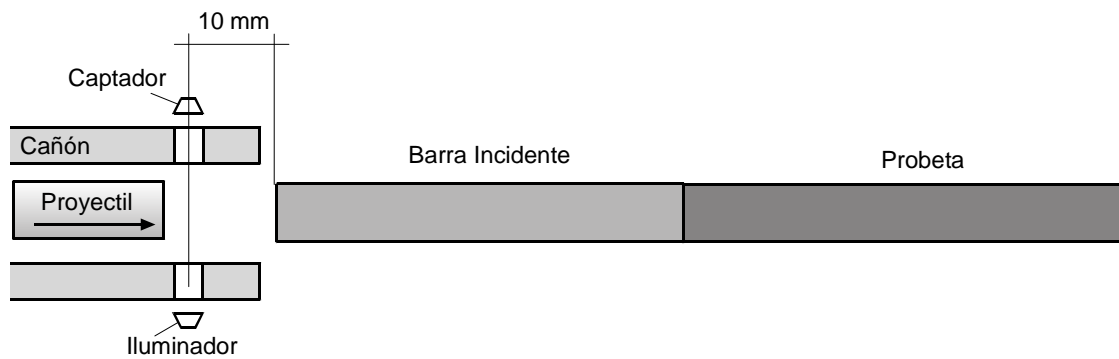


Figura 3.39. Posición de las foto células de disparo de los flashes.

De esta forma, la señal que genera el disparo del flash se produce cuando se corta el haz de luz por el paso del proyectil, situado 10 mm por delante de la barra incidente. Puesto que el proyectil en el recorrido final viaja a una velocidad de unos 20 m/s, el instante en que impacta sobre la barra incidente ocurre unos 500 μ s más tarde. En ese momento ya hay suficiente luz para fotografiar, y se mantendrá en valores superiores al 90% de iluminación al menos otros 500 μ s más. Este tiempo es más que suficiente para que se produzca la rotura de la probeta, pues entre el instante del impacto y el de la rotura median entre 60 y 80 μ s, dependiendo del material de la probeta.

Las células fotoeléctricas utilizadas son de tipo luz infrarroja para evitar interferencias con la iluminación de la sala de ensayos. Estos captadores son semiconductores activos que producen una tensión de salida entre 0 y 0.5 V, dependiendo de la cantidad de luz recibida. Esta tensión es la que se utiliza para cerrar un relé de tipo semiconductor, que tiene una velocidad de cierre del orden de los nanosegundos. El circuito seleccionado se representa en la Figura 3.40. La tensión que proviene de la fotocélula se amplifica y se

compara con un valor de tensión, el cual es regulable. Si la señal que proviene del captador es menor que la señal de referencia, el relé permanece abierto. Pero cuando ocurre lo contrario el relé se cierra instantáneamente, activando los flashes. Un diodo luminoso completa el circuito, indicando cuando está cerrado el relé.

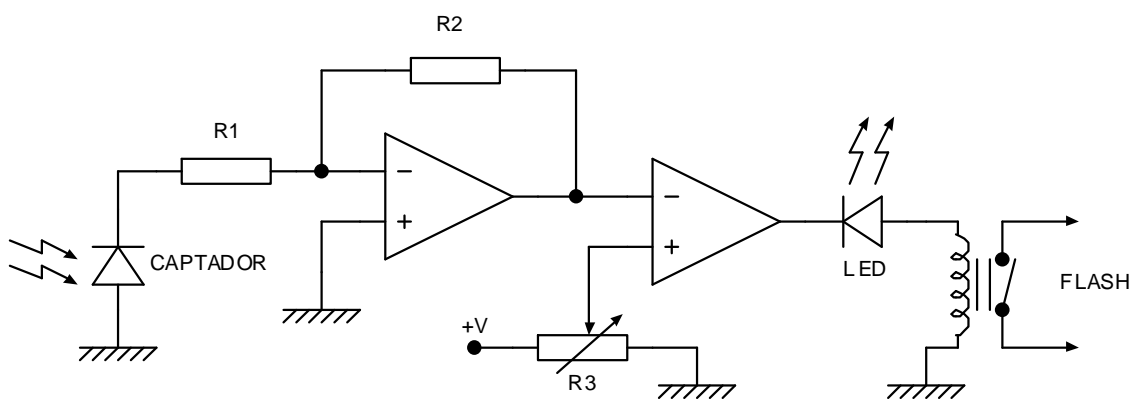


Figura 3.40. Circuito de disparo de los flashes.

4 RESULTADOS EXPERIMENTALES

4.1 Materiales.

En esta tesis el estudio se centra en seis materiales cerámicos avanzados de uso estructural. Los materiales objeto del estudio se encuentran entre los más empleados en protecciones ante amenazas de tipo balístico. Se trata de tres alúminas en distintos grados de pureza, 94%, 98% y 99.5%, alúmina con zirconia, carburo de silicio y carburo de boro. Para referirnos a ellos en esta tesis los denominaremos con el siguiente código de tres letras: A94, A98, A99, AZR, SIC y B4C respectivamente, según se muestra en la Tabla 4.1.

Todos los materiales fueron suministrados por Morgan Matroc, junto con varias hojas de propiedades determinadas por el fabricante.

Para determinar la resistencia a tracción de cada material se realizaron dos tipos de ensayos. El primero consistió en ensayos de tracción indirecta por compresión diametral, realizándolos tanto en condiciones estáticas como dinámicas. El segundo método empleado fueron los ensayos de tracción uniaxial por "spalling" en condiciones dinámicas. También se realizaron ensayos de compresión estáticos y dinámicos.

En el caso del A94, A99, SIC y B4C, las probetas fueron suministradas ya mecanizadas. La geometría consistió en discos de 8 mm de diámetro y 4 mm de espesor para los ensayos de tracción indirecta por compresión diametral y en cilindros de 8 mm de diámetro y 100 mm de longitud para los ensayos de tracción uniaxial por "spalling". En el caso del A98 y AZR el fabricante suministró placas de 100 mm por 100 mm y 30 mm de espesor. Estas placas se mecanizaron con herramientas de diamante en un taller de precisión y se obtuvieron probetas de 8 mm de diámetro y 100 mm de longitud de cada material y discos de 12 mm de diámetro y 6 mm de espesor.

Tabla 4.1. Nomenclatura utilizada para cada uno de los diferentes materiales ensayados.

| <i>Material</i> | <i>Nomenclatura utilizada</i> |
|--|-------------------------------|
| <i>Al₂O₃ 94%</i> | <i>A94</i> |
| <i>Al₂O₃ 98%</i> | <i>A98</i> |
| <i>Al₂O₃ 99.5%</i> | <i>A99</i> |
| <i>Al₂O₃+ZrO₂</i> | <i>AZR</i> |
| <i>SiC</i> | <i>SIC</i> |
| <i>B₄C</i> | <i>B4C</i> |

Con el objeto de determinar la densidad real de cada material, las probetas destinadas a ensayos de "spalling" fueron pesadas y medidas. Mediante la técnica de excitación por impulsos descrita en el capítulo anterior se determinó el módulo de elasticidad y la velocidad de propagación de las ondas en cada probeta. En el apéndice dedicado a los ensayos de "spalling" se incluye la geometría de cada probeta junto con su densidad y su módulo de elasticidad. Del conjunto de mediciones se calculó la media y la desviación típica para cada material. Estos valores se resumen en la Tabla 4.2, donde se incluye también el acero de las barras del equipo dinámico y los valores de la impedancia mecánica, calculada como producto de la densidad por la velocidad de propagación.

Tabla 4.2. Densidades, módulo de elasticidad, velocidades de propagación e impedancias de los diferentes materiales empleados en esta Tesis. La desviación típica aparece entre paréntesis.

| <i>Material</i> | <i>r (Kg/m³)</i> | <i>E (GPa)</i> | <i>c (m/s)</i> | <i>z (Kg/m²s)</i> |
|-----------------|-----------------------------|-------------------|-------------------|------------------------------|
| <i>Acero</i> | <i>7830</i> | <i>203</i> | <i>5092</i> | <i>39.9·10⁶</i> |
| <i>A94</i> | <i>3658 (3.0)</i> | <i>303 (0.47)</i> | <i>9108 (4.1)</i> | <i>33.3·10⁶</i> |
| <i>A98</i> | <i>3877 (1.7)</i> | <i>366 (0.50)</i> | <i>9717 (6.1)</i> | <i>37.7·10⁶</i> |
| <i>A99</i> | <i>3905 (40)</i> | <i>391 (6.7)</i> | <i>10004 (35)</i> | <i>39.1·10⁶</i> |
| <i>AZR</i> | <i>4027 (2.5)</i> | <i>348 (1.2)</i> | <i>9292 (18)</i> | <i>37.4·10⁶</i> |
| <i>SIC</i> | <i>3132 (8.5)</i> | <i>420 (3.8)</i> | <i>11575 (37)</i> | <i>36.2·10⁶</i> |
| <i>B4C</i> | <i>2512 (3.4)</i> | <i>461 (1.2)</i> | <i>13549 (10)</i> | <i>34.0·10⁶</i> |

Se realizó un estudio microestructural con objeto de determinar el tamaño de grano de los diferentes materiales estudiados. Para revelar el tamaño de grano se pulieron las probetas con polvo de diamante en suspensión en pasos sucesivos de 40 μm , 9 μm , 3 μm y 1 μm . A continuación se realizó un ataque químico con diferentes reactivos (Lee 1994), en los materiales de base alúmina se empleó ácido ortofosfórico y en el carburo de silicio se utilizó la solución Murakami modificada, ambas en ebullición, con los tiempos de ataque que se especifican en la Tabla 4.3. En el carburo de boro no se consiguieron resultados satisfactorios con ningún reactivo, por lo que no se pudo determinar el tamaño de grano. Para examinar los diferentes materiales de alúmina en el microscopio electrónico de barrido fue necesario metalizar las probetas para conseguir una superficie conductora, mientras que en los carburos no fue preciso al ser materiales conductores.

Tabla 4.3. Reactivos empleados en el ataque químico para revelar la microestructura de los materiales. En el B4C no se consiguieron resultados satisfactorios, por lo que no aparece.

| <i>Material</i> | <i>Reactivo</i> | <i>Tiempo</i> |
|-----------------|---|-----------------|
| <i>A94</i> | <i>H₃PO₄ en ebullición</i> | <i>2 min.</i> |
| <i>A98</i> | | <i>4 min.</i> |
| <i>A99</i> | | <i>6 min.</i> |
| <i>AZR</i> | | <i>4.5 min.</i> |
| <i>SIC</i> | <i>Solución Murakami modificada en ebullición.</i> <i>30 g. K₃Fe(CN)₆</i> <i>3 g. NaOH</i> <i>100 cc. Agua destilada</i> | <i>15 min.</i> |

Para determinar el tamaño de grano de cada uno de los materiales se utilizó el método Hayes (ASTM 1988) y las fotografías de la microestructura, obtenidas mediante un microscopio electrónico de barrido. El tamaño de grano medio para cada material se muestra en la Tabla 4.4 y las fotografías se muestran a continuación. En el A94 los tamaños de grano oscilaron bastante, encontrándose granos de más de 25 μm , mientras que el valor medio fue 8.3 μm . En el A98 el tamaño presenta también una cierta dispersión, aunque menor que en el caso anterior. En el resto de materiales los granos presentaron un aspecto más homogéneo. En cuanto al tamaño del defecto típico encontrado en el interior de las cerámicas, fue de 13.6 μm en el A94, 1.5 μm en el A98, 24.4 μm en el A99, 5.8 μm en el AZR y 16.5 μm en el SiC.

Tabla 4.4. Tamaño de grano medido en los diferentes materiales, excepto en el B4C, ya que no se pudo determinar por no revelarse el grano en el ataque.

| <i>Material</i> | <i>Tamaño de grano medio (mm)</i> |
|-----------------|-----------------------------------|
| <i>A94</i> | <i>8.3</i> |
| <i>A98</i> | <i>2.4</i> |
| <i>A99</i> | <i>10.4</i> |
| <i>AZR</i> | <i>2.0</i> |
| <i>SIC</i> | <i>3.3</i> |

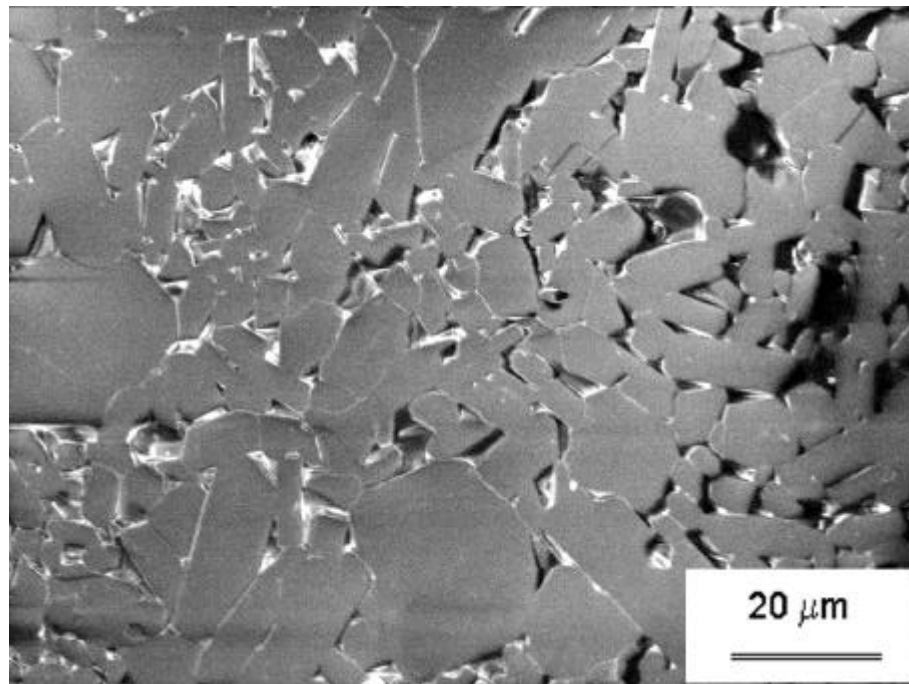


Figura 4.1. Fotografía del material A94 a 1000 aumentos mostrando el tamaño de grano, obtenida en el microscopio electrónico de barrido.

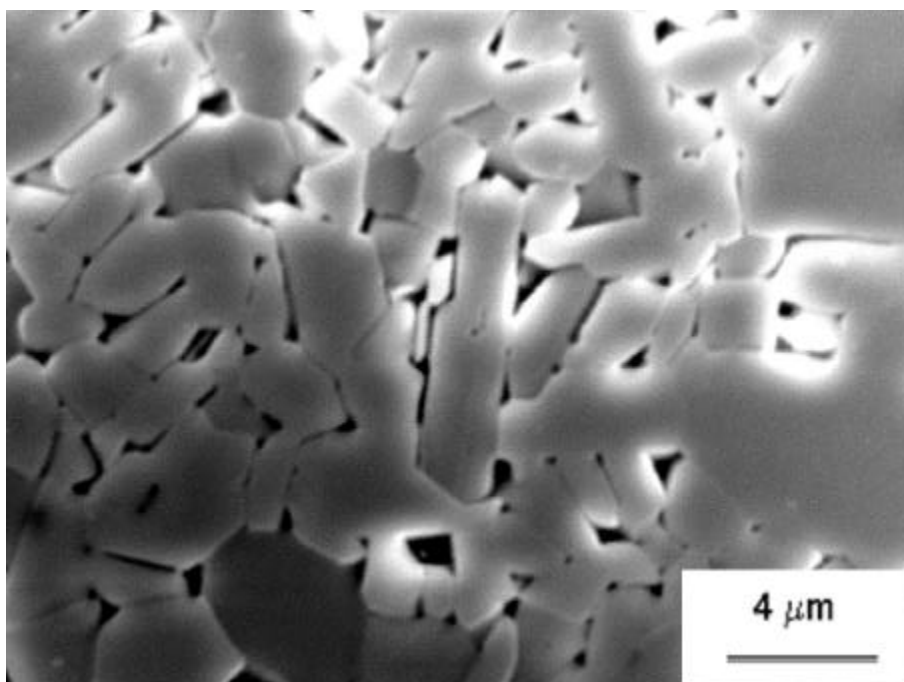


Figura 4.2. Fotografía del material A98 a 5000 aumentos mostrando el tamaño de grano, obtenida en el microscopio electrónico de barrido.

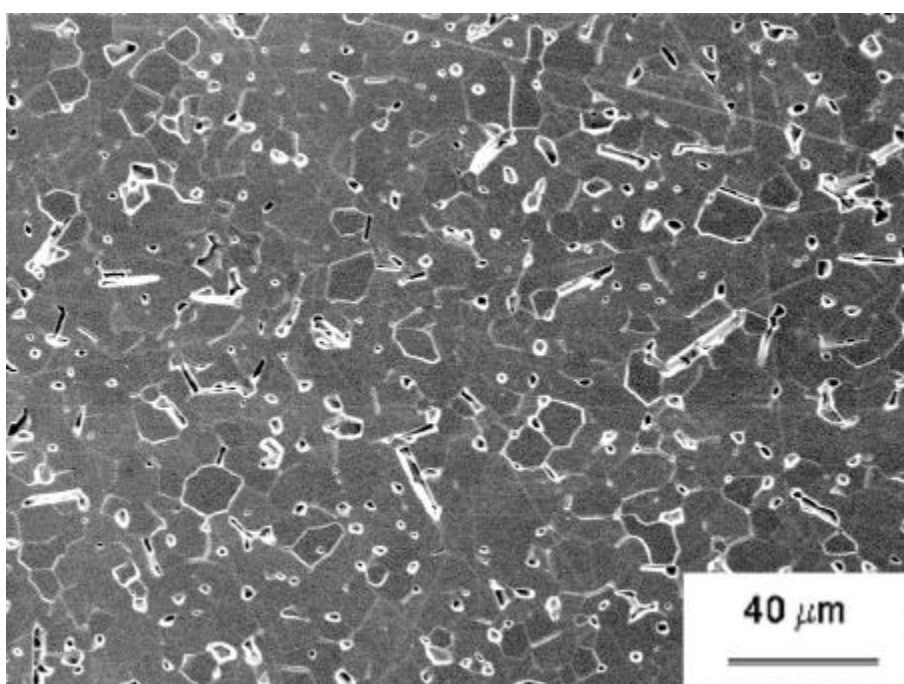


Figura 4.3. Fotografía del material A99 a 500 aumentos mostrando el tamaño de grano, obtenida en el microscopio electrónico de barrido.

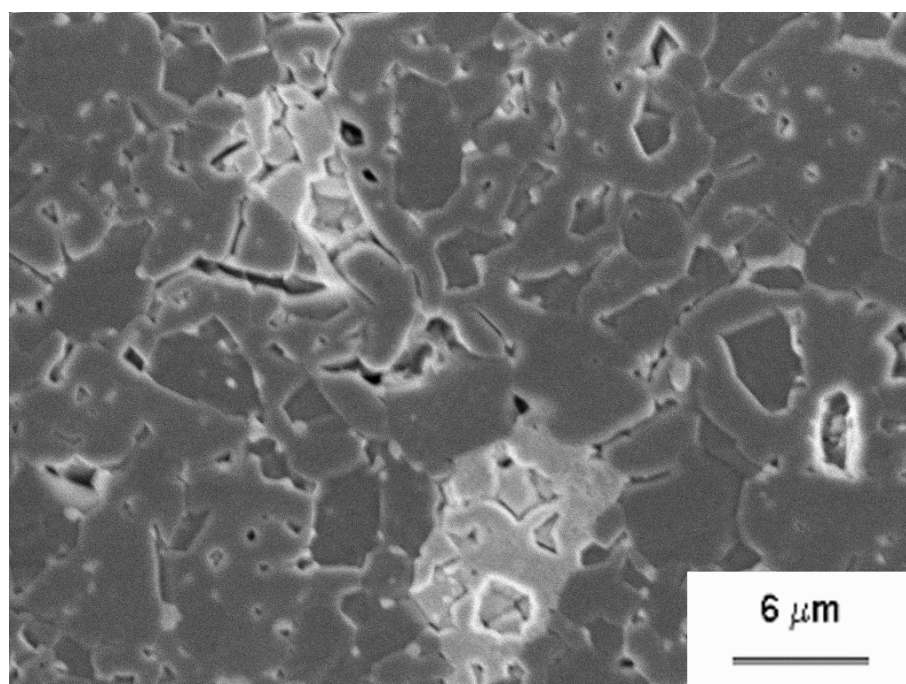


Figura 4.4. Fotografía del material AZR a 1000 aumentos mostrando el tamaño de grano, obtenida en el microscopio electrónico de barrido. Las zonas más oscuras corresponden a alúmina y las más claras a zirconia.

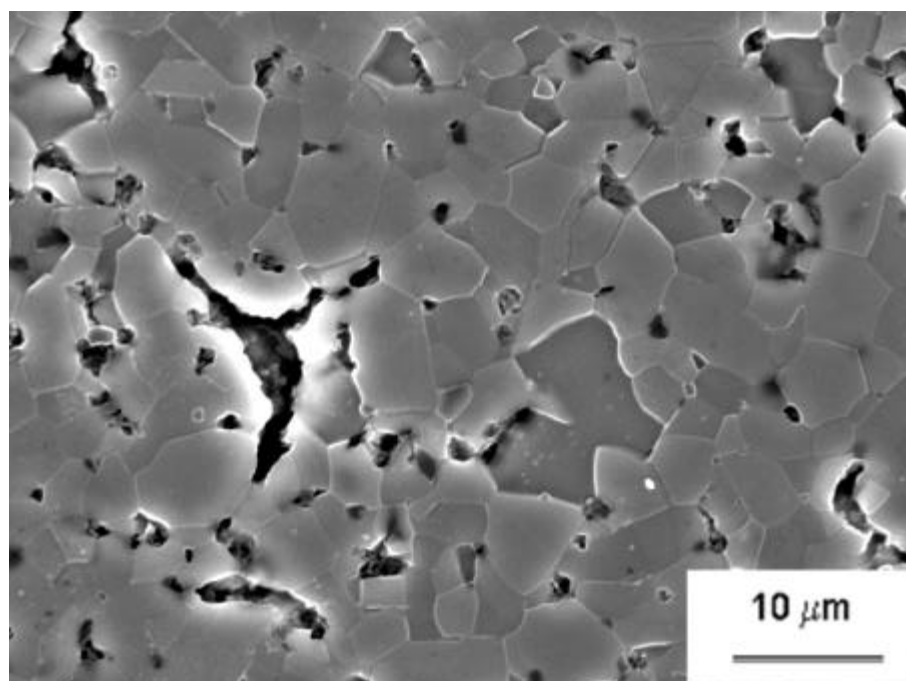


Figura 4.5. Fotografía del material SIC a 2000 aumentos mostrando el tamaño de grano, obtenida en el microscopio electrónico de barrido.

4.2 Ensayos de tracción indirecta por compresión diametral.

Los ensayos se dividieron en tres grupos en función de la velocidad de deformación. Los ensayos a la velocidad de deformación más baja y a la velocidad de deformación intermedia se realizaron en máquinas servohidráulicas Instron modelos 8501 y 1270, controlando el desplazamiento del actuador. Las velocidades de desplazamiento del actuador en los ensayos lentos fue de 0.2 $\mu\text{m/s}$ y en los intermedios 2 mm/s. Para los ensayos más rápidos se utilizó la técnica de la barra Hopkinson descrita anteriormente.

La velocidad de deformación no es una magnitud única en el ensayo brasileño, sino que es diferente en cada punto de la probeta. Por ello se determinó la velocidad de deformación a través de la velocidad de crecimiento de la tensión de tracción en el plano de aplicación de las cargas. Esto es realmente lo que interesa al ser esa la zona de la probeta donde se produce la rotura. En consecuencia, la velocidad de deformación se determinó a través de la siguiente expresión:

$$(2-1) \quad \dot{\epsilon}_{\text{CompresiónDiametral}} = \frac{1}{E} \left(\frac{\partial s_t}{\partial t} \right)_{\text{PlanoAplicación}}$$

Donde s_t es la tensión de tracción que aparece en el plano de aplicación de las cargas en cada instante, t es el tiempo y E el módulo de elasticidad del material.

El número de ensayos realizados, la velocidad de deformación media de cada grupo de ensayos, la resistencia a tracción media para cada velocidad de deformación y la desviación típica se presentan en la Tabla.4.5.

La comparación entre los distintos materiales de la resistencia a tracción indirecta por compresión diametral a la velocidad de deformación más baja se muestra en la Figura 4.6. En ella se aprecia que las alúminas presentan una dispersión menor y valores medios inferiores que los carburos. En la Figura 4.7 se presenta la misma comparación para la velocidad de deformación media, apreciándose que el carburo de boro presenta un aumento en su resistencia respecto al caso anterior, mientras que la dispersión sigue la misma tendencia. Los resultados para la velocidad de deformación más elevada se recogen en la Figura 4.8. A estas velocidades de deformación, la resistencia a tracción de las alúminas aumenta hasta equipararse a los carburos, siendo la dispersión ahora equivalente en casi todos los materiales.

Los resultados de los ensayos parecen indicar que la resistencia a tracción aumenta con la velocidad de deformación, de manera más acusada en las alúminas que en los carburos. También se aprecia que la dispersión experimental es elevada en todos los materiales, siendo más acentuada en los carburos que en las alúminas a velocidades de deformación bajas y similar a velocidades de deformación altas.

Tabla.4.5. Resultados de los ensayos de tracción indirecta por compresión diametral realizados a diferentes velocidades de deformación. La desviación típica aparece entre parentesis.

| <i>Material Ensayado</i> | <i>Núm. de Ensayos</i> | <i>Velocidad de deformación (s^{-1})</i> | <i>Resistencia a tracción (MPa)</i> |
|--------------------------|------------------------|---|-------------------------------------|
| <i>A94</i> | <i>5</i> | <i>$8.3 (1.3) \cdot 10^{-7}$</i> | <i>161 (23)</i> |
| | <i>4</i> | <i>$5.1 (1.0) \cdot 10^{-3}$</i> | <i>181 (8)</i> |
| | <i>9</i> | <i>89 (14)</i> | <i>278 (28)</i> |
| <i>A98</i> | <i>6</i> | <i>$9.2 (3.6) \cdot 10^{-7}$</i> | <i>179 (21)</i> |
| | <i>6</i> | <i>77 (10)</i> | <i>285 (31)</i> |
| <i>A99</i> | <i>10</i> | <i>$7.3 (2.9) \cdot 10^{-7}$</i> | <i>161 (26)</i> |
| | <i>5</i> | <i>$5.0 (0.4) \cdot 10^{-3}$</i> | <i>163 (29)</i> |
| | <i>8</i> | <i>76 (20)</i> | <i>243 (43)</i> |
| <i>AZR</i> | <i>7</i> | <i>$9.9 (0.3) \cdot 10^{-7}$</i> | <i>155 (12)</i> |
| | <i>1</i> | <i>$5.0 \cdot 10^{-3}$</i> | <i>172</i> |
| | <i>6</i> | <i>85 (10)</i> | <i>288 (30)</i> |
| <i>SIC</i> | <i>5</i> | <i>$6.9 (0.6) \cdot 10^{-7}$</i> | <i>214 (55)</i> |
| | <i>5</i> | <i>$6.5 (0.5) \cdot 10^{-3}$</i> | <i>233 (40)</i> |
| | <i>9</i> | <i>66 (18)</i> | <i>248 (58)</i> |
| <i>B4C</i> | <i>5</i> | <i>$6.9 (0.6) \cdot 10^{-7}$</i> | <i>211 (52)</i> |
| | <i>5</i> | <i>$6.6 (0.5) \cdot 10^{-3}$</i> | <i>276 (41)</i> |
| | <i>9</i> | <i>65 (12)</i> | <i>261 (50)</i> |

Ensayos Estáticos de Tracción Indirecta por Compresión Diametral
Velocidad de Deformación Baja

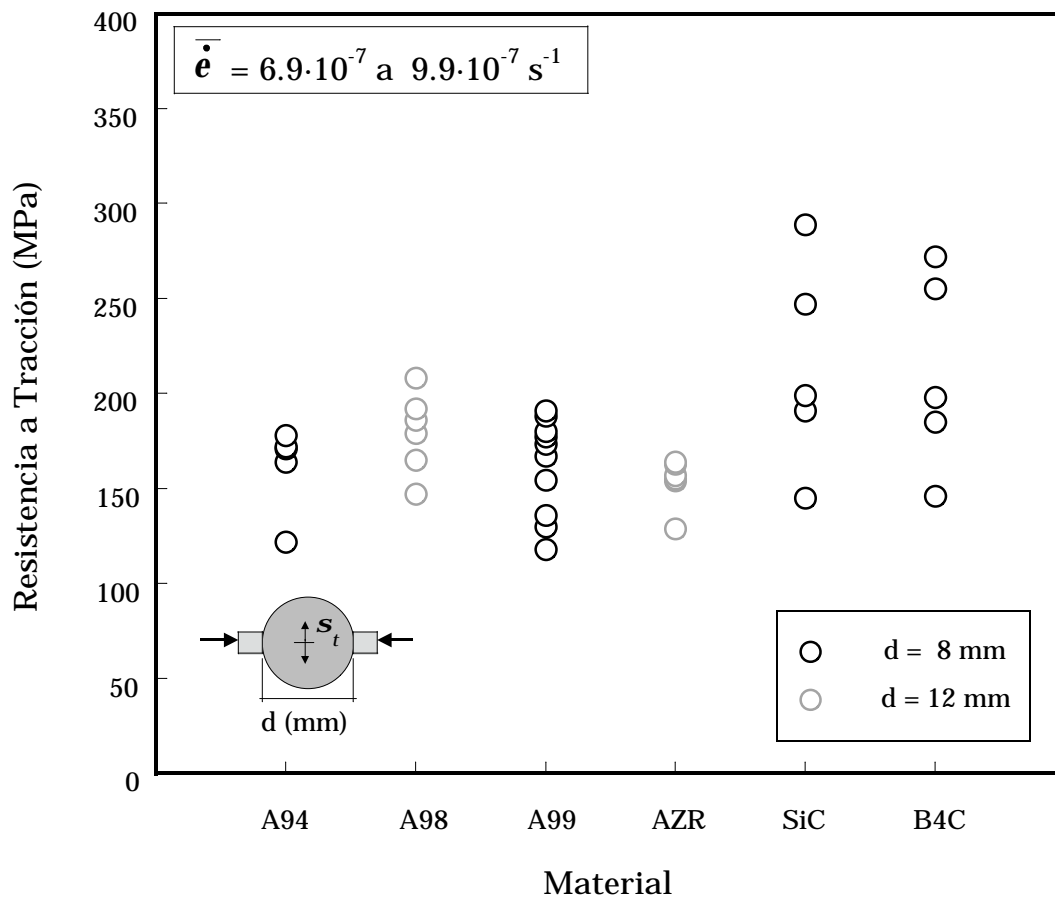


Figura 4.6. Ensayos de compresión diametral a velocidades de deformación bajas realizados en máquinas de ensayo servohidráulicas. Resultados de resistencia a tracción de todos los materiales estudiados.

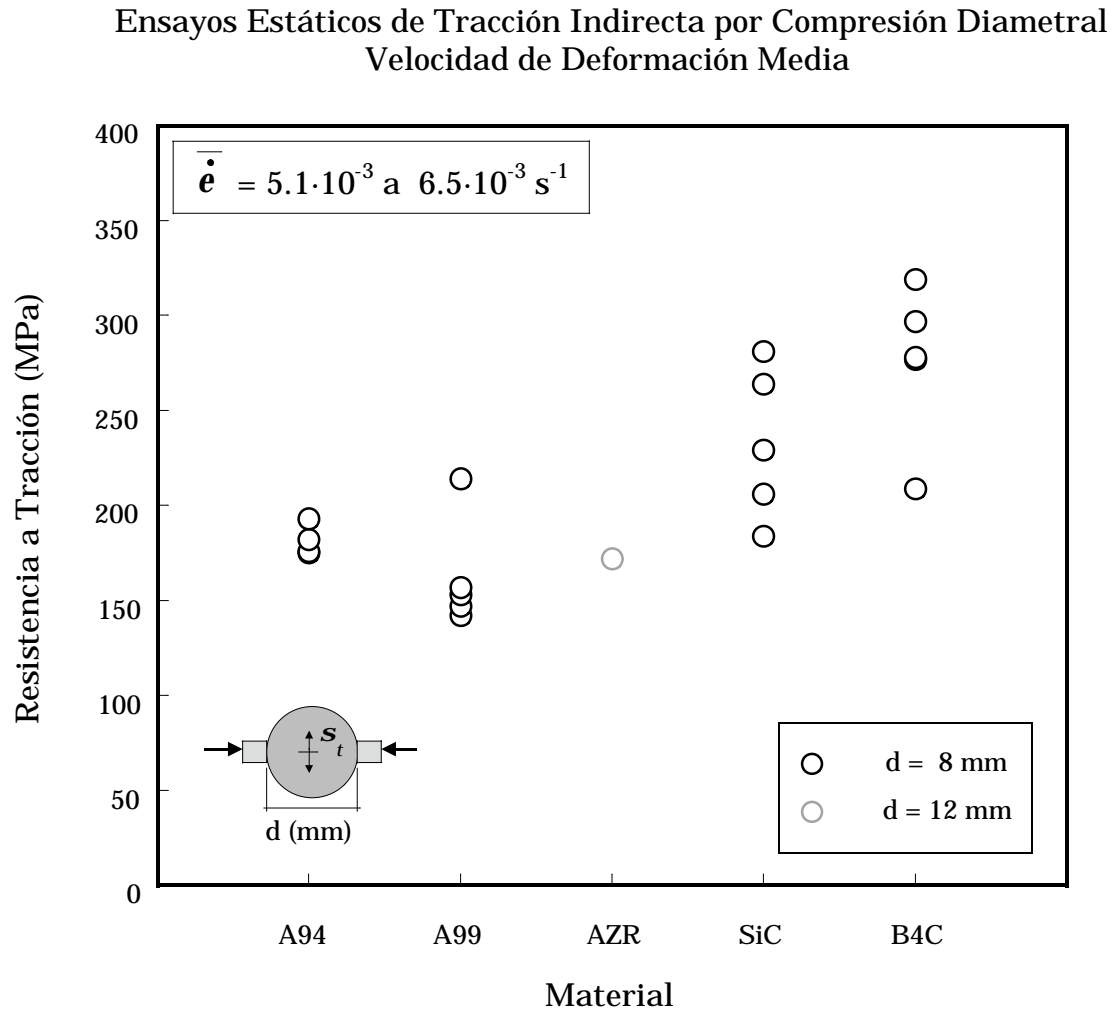


Figura 4.7. Ensayos de compresión diametral a velocidades de deformación medias realizados en máquinas de ensayo servohidráulicas. Resultados de resistencia a tracción de todos los materiales estudiados.

Ensayos Estáticos de Tracción Indirecta por Compresión Diametral
Velocidad de Deformación Alta

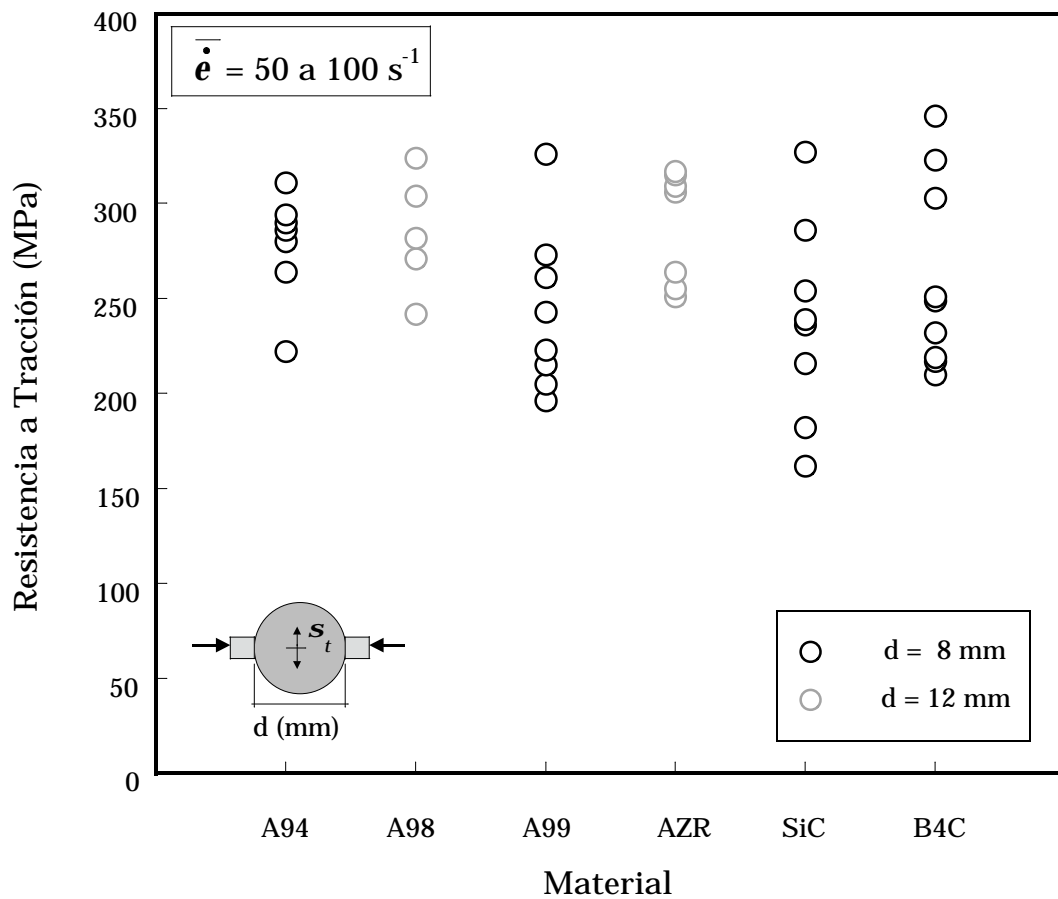


Figura 4.8. Ensayos de compresión diametral a velocidades de deformación altas realizados en barra Hopkinson. Resultados de resistencia a tracción de todos los materiales estudiados.

4.3 Ensayos dinámicos de tracción uniaxial por "spalling".

La técnica empleada, original en esta tesis, ha sido descrita y analizada con detalle en el capítulo anterior, y permite determinar la resistencia a tracción en condiciones de carga uniaxial y a altas velocidades de deformación.

La velocidad de deformación durante el ensayo se determinó a través de la velocidad de crecimiento de la tensión de tracción en la sección en que aparece la rotura según la siguiente expresión:

$$(2-2) \quad \dot{\epsilon}_{Spalling} = \frac{1}{E} \left(\frac{\partial s_t}{\partial t} \right)_{Pto. Rotura}$$

Donde s_t es la tensión de tracción que aparece en la sección de rotura en cada instante, t es el tiempo y E el módulo de elasticidad.

En la Tabla 4.6 se presentan los resultados para cada material, indicando el número de ensayos realizados, la velocidad de deformación media obtenida, la resistencia a tracción media y su desviación típica.

Tabla 4.6. Resultados de los ensayos dinámicos de tracción uniaxial por "spalling" realizados a diferentes velocidades de deformación. La desviación típica se muestra entre paréntesis.

| <i>Material Ensayado</i> | <i>Núm. de Ensayos</i> | <i>Velocidad de deformación (s^{-1})</i> | <i>Resistencia a tracción (MPa)</i> |
|--------------------------|------------------------|---|-------------------------------------|
| <i>A94</i> | <i>8</i> | <i>850 (90)</i> | <i>358 (51)</i> |
| <i>A98</i> | <i>5</i> | <i>800 (-)</i> | <i>329 (78)</i> |
| <i>A99</i> | <i>7</i> | <i>780 (129)</i> | <i>271 (38)</i> |
| <i>AZR</i> | <i>5</i> | <i>800 (-)</i> | <i>322 (35)</i> |
| <i>SIC</i> | <i>3</i> | <i>365 (98)</i> | <i>289 (40)</i> |
| <i>B4C</i> | <i>4</i> | <i>370 (81)</i> | <i>281 (16)</i> |

La comparación de la resistencia a tracción medida en los distintos materiales se muestra en la Figura 4.9. Se aprecia que la dispersión es similar en todos los materiales, aunque algo más elevada en el A98. Además, para los carburos la dispersión es mucho menor en este tipo de ensayos que en los de tracción indirecta por compresión diametral.

La velocidad de deformación media en estos ensayos fue de $800\ s^{-1}$ en las alúminas y de casi $400\ s^{-1}$ en los carburos. La diferencia estriba en que se utilizó un proyectil diferente en los carburos para evitar la multifisuración.

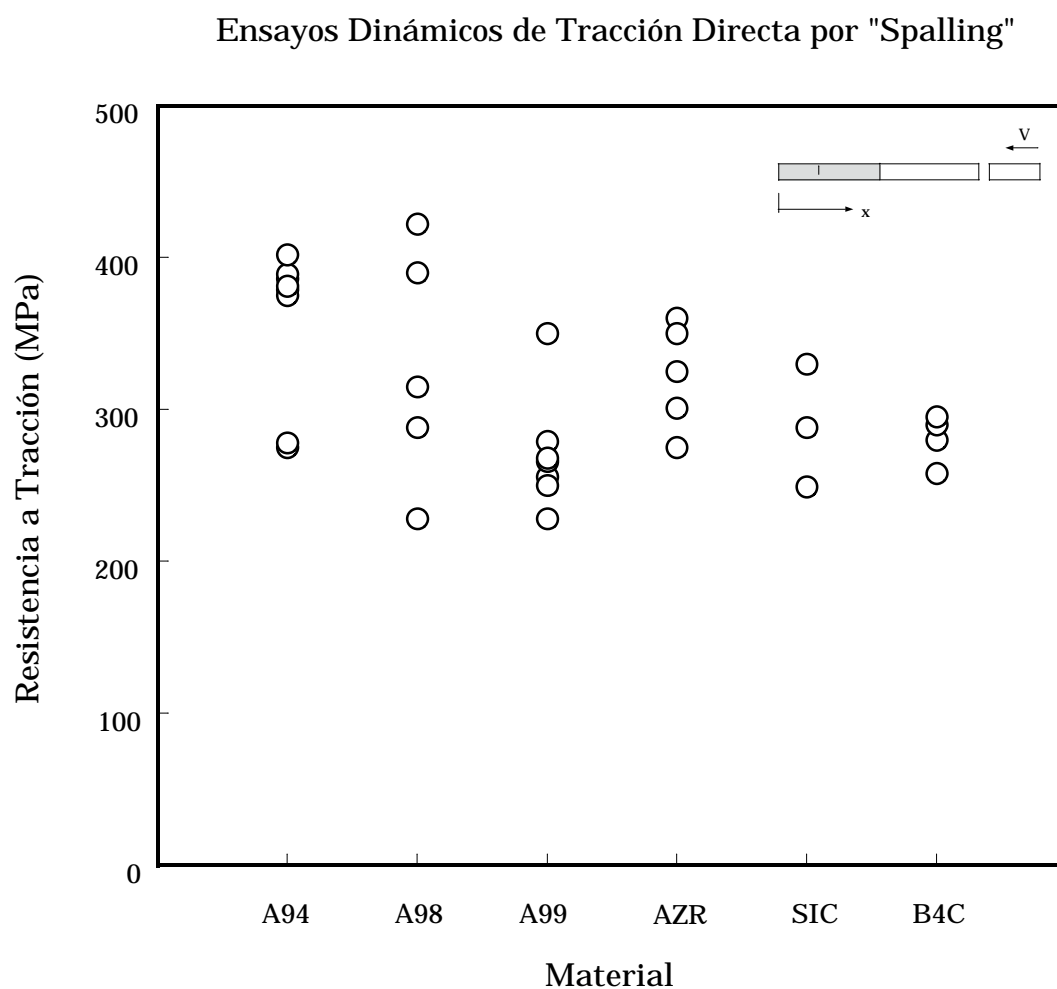


Figura 4.9. Resultados de todos los materiales estudiados de resistencia a tracción determinada por ensayos dinámicos de tracción uniaxial por "spalling".

4.4 Ensayos de compresión.

Se realizaron ensayos de compresión estáticos en máquinas de ensayos convencionales y dinámicos mediante la técnica de la barra Hopkinson tal y como se han descrito en el capítulo anterior.

Con estos ensayos no fue posible determinar la resistencia a compresión de todos los materiales. Como segundo objetivo se pretendía justificar que las cargas de compresión que aparecen tanto en los ensayos brasileños como en los ensayos de "spalling", no son suficientes como para producir daño o rotura en el material. En todos los casos el comportamiento del material fue elástico y lineal hasta cargas elevadas, superiores a los 2 GPa.

El único material que alcanzó la rotura con garantías, tanto en condiciones estáticas como dinámicas, fue el A94. La resistencia a compresión medida fue de 2100 MPa, llegándose hasta este punto de una forma elástica y lineal. También se realizaron ensayos estáticos en máquinas servohidráulicas convencionales en A99, SIC y B4C, pero no se consiguió llegar a la rotura sin que se produjeran roturas en el dispositivo de carga, invalidando a partir de este momento los resultados. Cuando esto ocurrió el material presentaba aún un comportamiento elástico y lineal y las tensiones de compresión en las probetas superaban los 3400 MPa, por lo que puede afirmarse que la resistencia a compresión de estos materiales es superior a este valor.

En definitiva, los resultados de estos ensayos permiten afirmar que las tensiones de compresión que se generan en los ensayos brasileños y de "spalling" están muy por debajo de la resistencia a compresión, por lo que es razonable suponer que no se producen daños o pequeñas roturas en el material y en consecuencia no condicionan las medidas de la resistencia a tracción.

4.5 Influencia de la velocidad de deformación y el tipo de ensayo en la resistencia a tracción.

En las figuras siguientes (Figura 4.10 a Figura 4.15) se muestran los resultados experimentales de resistencia a tracción en función de la velocidad de deformación, incluyendo los resultados de todos los tipos de ensayo.

En los ensayos de tracción indirecta por compresión diametral realizados en máquinas de ensayo convencionales, no se aprecia una variación significativa de la resistencia a tracción con la velocidad de deformación a excepción del carburo de boro en el que la resistencia a tracción obtenida sufre un incremento del 22%, como puede apreciarse en la Figura 4.15. En estos ensayos la velocidad de deformación obtenida fue desde los $6.9 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ a los $6.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$, por tanto, puede concluirse que en este intervalo de velocidades de deformación, la resistencia a tracción no sufre variaciones apreciables en los materiales estudiados a excepción del ya mencionado carburo de boro.

Para seguir aumentando la velocidad de deformación se mantuvo el mismo tipo de ensayo, tracción indirecta por compresión diametral, pero utilizando ahora el dispositivo experimental de la barra Hopkinson. Con este tipo de ensayo la velocidad de deformación experimentada se aproximó a los 10^2 s^{-1} . Los resultados muestran un incremento de la resistencia a tracción en todos los materiales exceptuando los carburos. El aumento de la resistencia obtenido en los óxidos fue apreciable, llegando casi a duplicar su valor: 40% en el A94, 37% en el A98, 50% en el A99 y 84% en el AZR. En el carburo de silicio el ligero aumento de resistencia obtenido es muy poco significativo y no puede ser tenido en cuenta al considerar la dispersión experimental. En el carburo de boro tampoco se aprecia ninguna variación significativa.

La resistencia a tracción determinada mediante los ensayos dinámicos de tracción uniaxial por "spalling" es en todos los materiales ligeramente mayor que en los ensayos dinámicos de tracción indirecta por compresión diametral. El aumento del valor medio de la resistencia a tracción fue del 23% en el A94, 20% en el A98, 12% en el A99, 13% en el AZR, 16% en el SIC y del 8% en el B4C. La variación del valor medido de esta propiedad es del orden de la dispersión experimental, pero la tendencia del valor medio es siempre al alza. Este aumento puede justificarse por la mayor velocidad de deformación, aunque también hay que tener en cuenta que tanto la geometría de la probeta como el dispositivo de ensayos es totalmente distinto. Además, en los ensayos dinámicos de "spalling" el estado tensional es uniaxial mientras que en los ensayos de compresión diametral el estado de cargas es biaxial, existiendo tensiones de compresión varias veces superiores a las tensiones de tracción que producen la rotura del material. Por ello, este aumento en la resistencia a tracción podría justificarse si el material obedece a un criterio de rotura tipo Mohr-Coulomb.

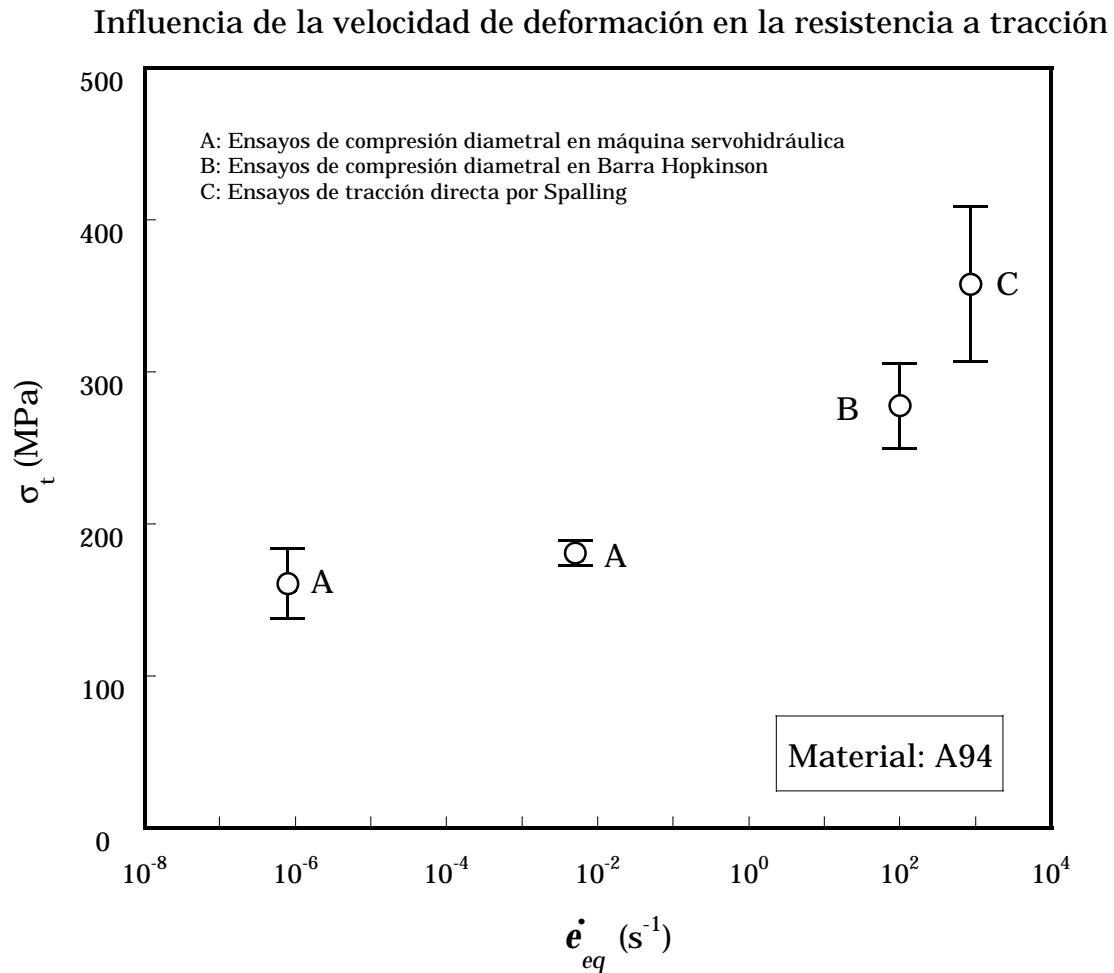


Figura 4.10. Resistencia a tracción en función de la velocidad de deformación de la alúmina de 94% de pureza. Resultados de los ensayos estáticos y dinámicos de tracción indirecta por compresión diametral y de tracción dinámica uniaxial por "spalling".

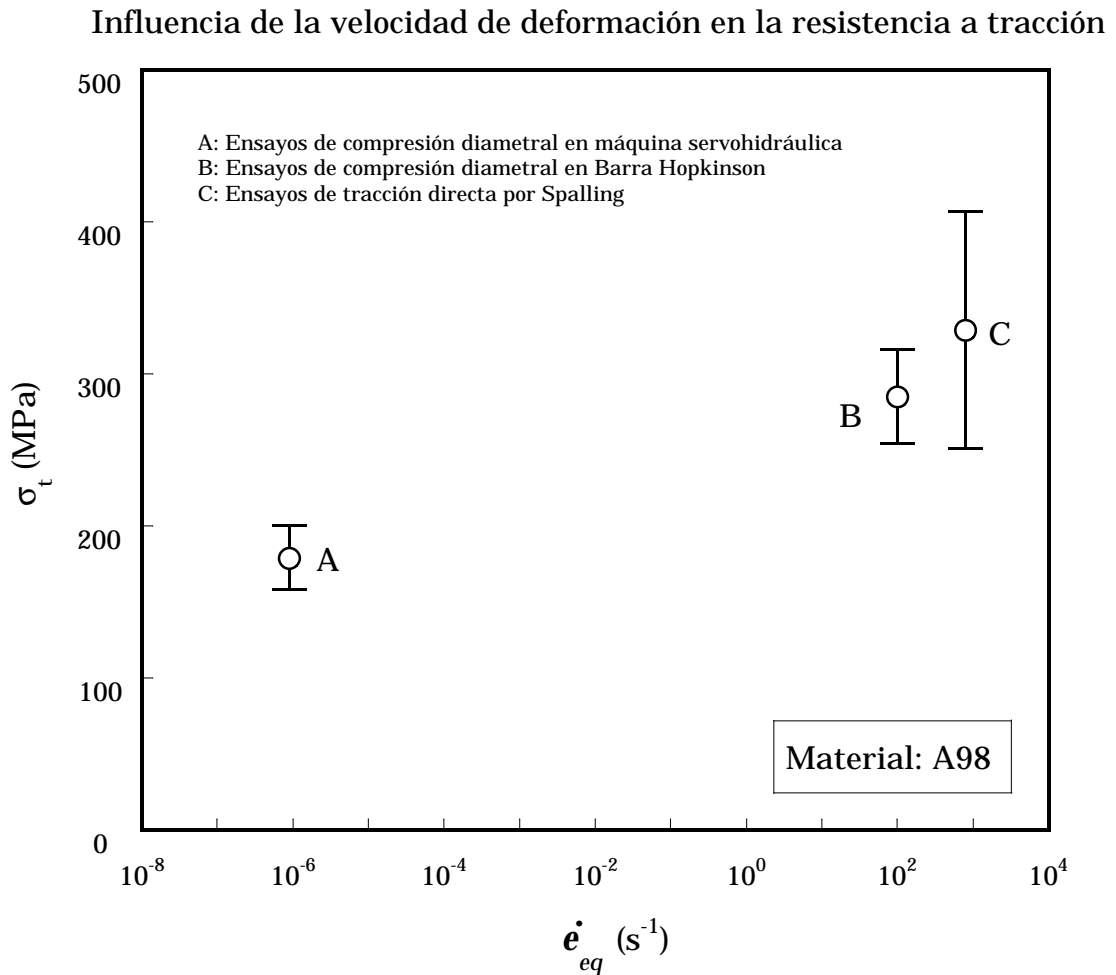


Figura 4.11. Resistencia a tracción en función de la velocidad de deformación de la alúmina de 98% de pureza. Resultados de los ensayos estáticos y dinámicos de tracción indirecta por compresión diametral y de tracción dinámica uniaxial por "spalling".

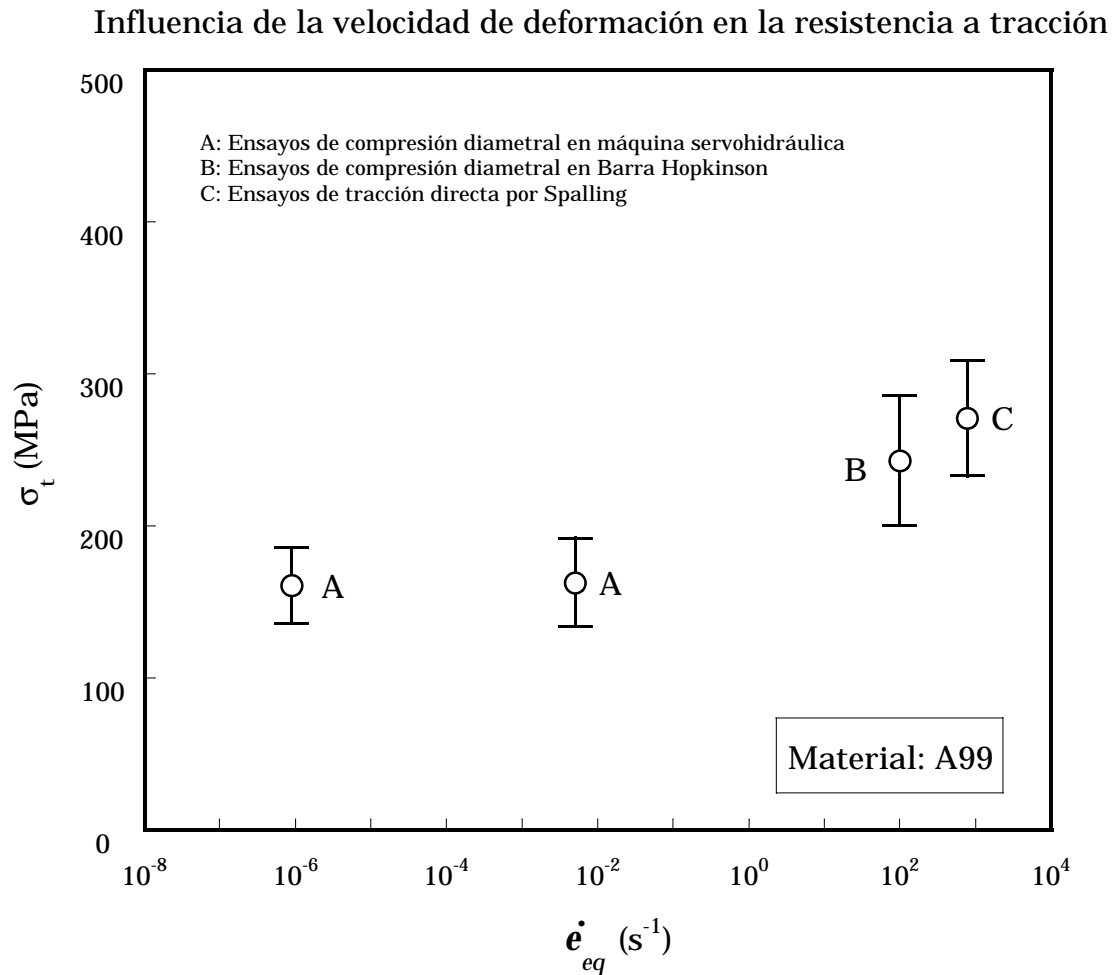


Figura 4.12. Resistencia a tracción en función de la velocidad de deformación de la alúmina de 99.5% de pureza. Resultados de los ensayos estáticos y dinámicos de tracción indirecta por compresión diametral y de tracción dinámica uniaxial por "spalling".

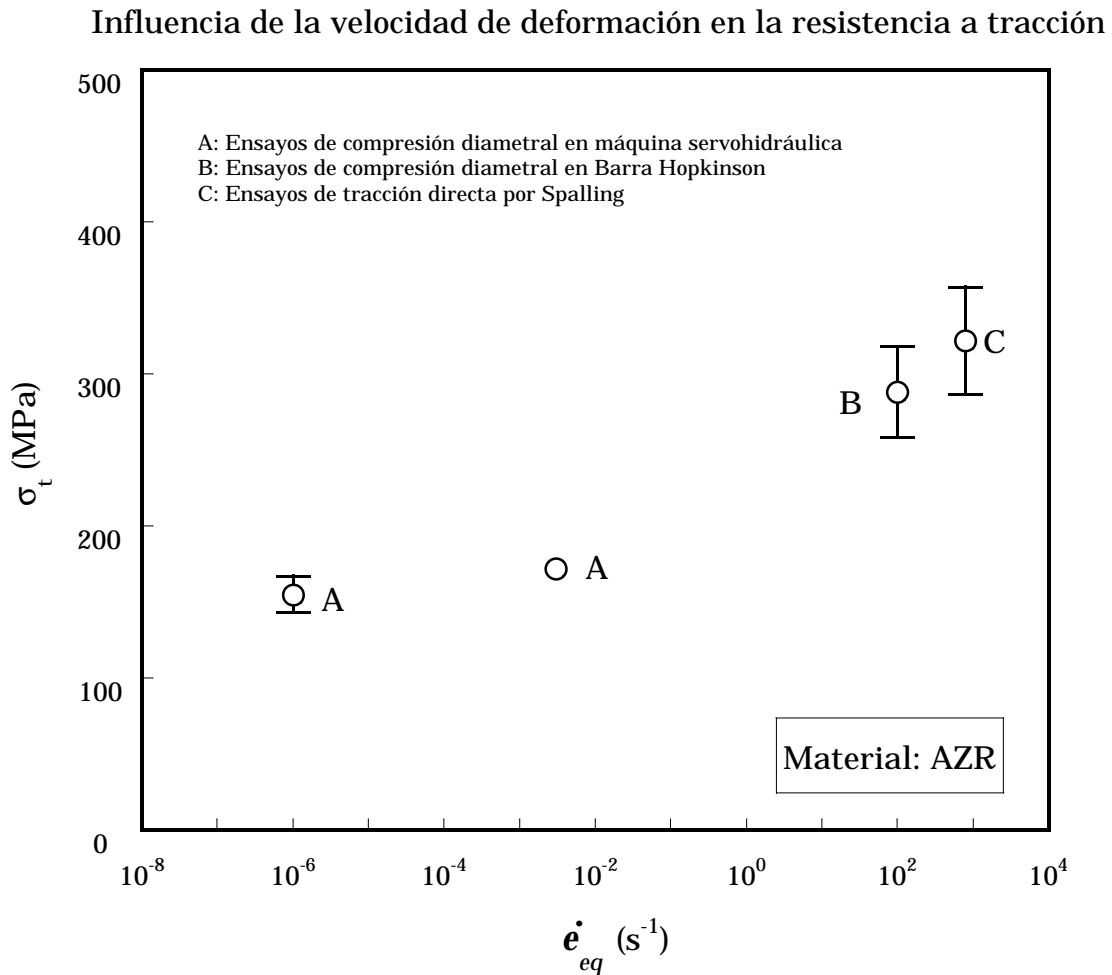


Figura 4.13. Resistencia a tracción en función de la velocidad de deformación de la alúmina con zirconia. Resultados de los ensayos estáticos y dinámicos de tracción indirecta por compresión diametral y de tracción dinámica uniaxial por "spalling".

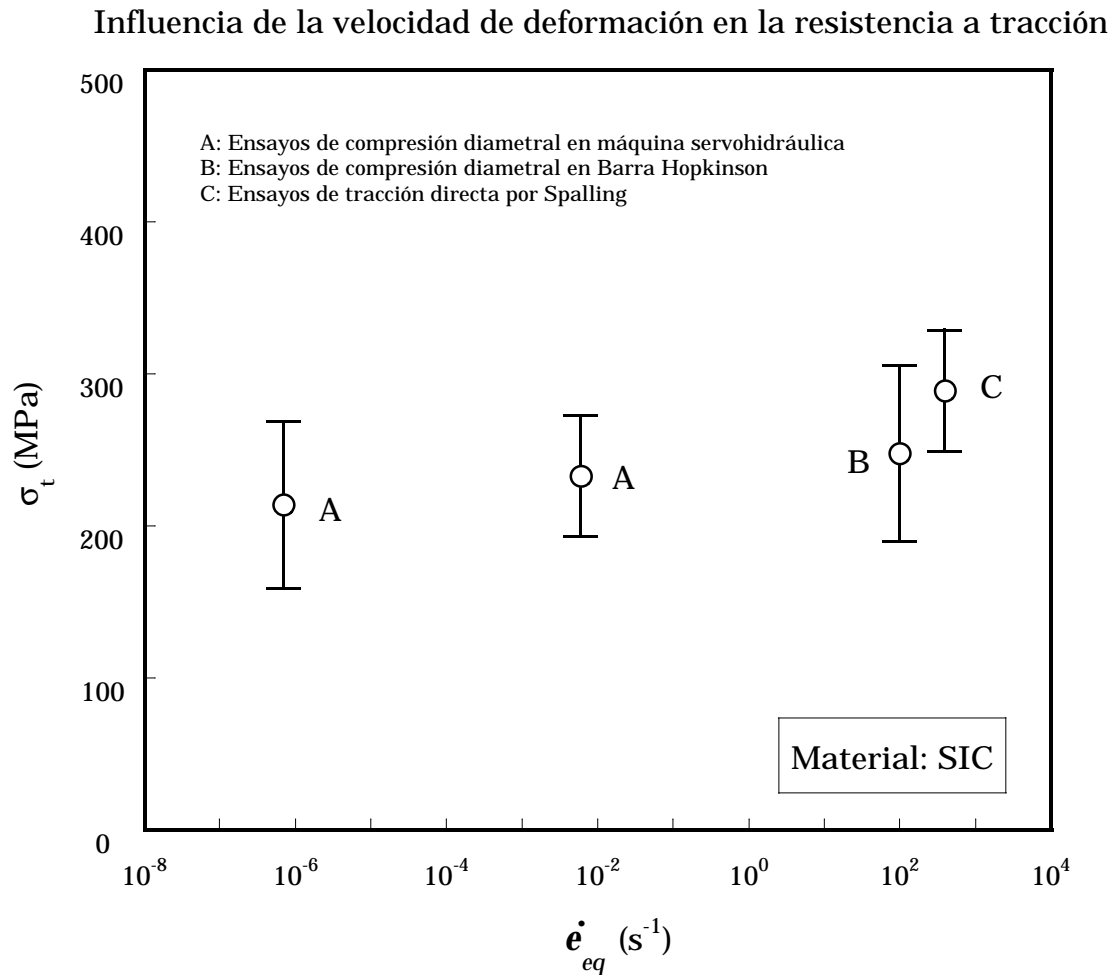


Figura 4.14. Resistencia a tracción en función de la velocidad de deformación del carburo de silicio. Resultados de los ensayos estáticos y dinámicos de tracción indirecta por compresión diametral y de tracción dinámica uniaxial por "spalling".

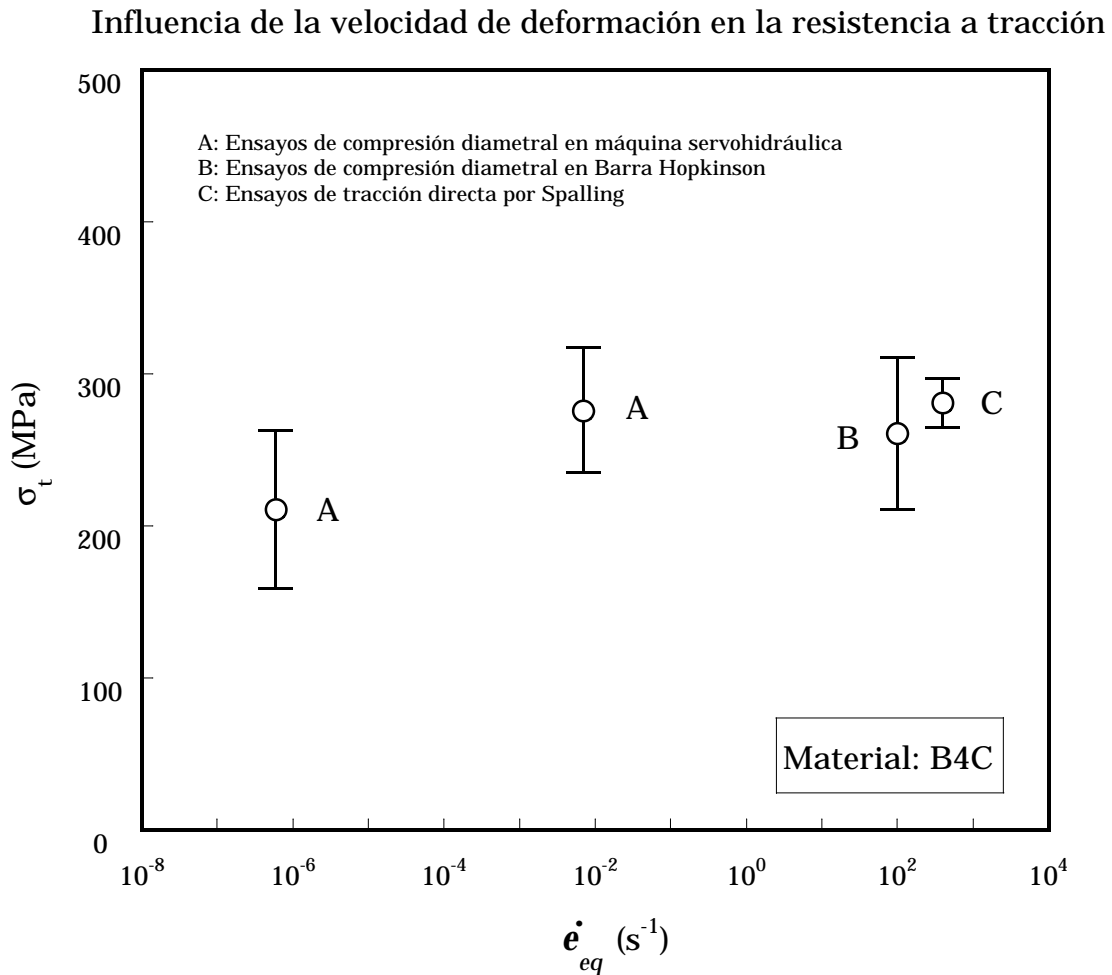


Figura 4.15. Resistencia a tracción en función de la velocidad de deformación del carburo de boro. Resultados de los ensayos estáticos y dinámicos de tracción indirecta por compresión diametral y de tracción dinámica uniaxial por "spalling".

4.6 Análisis fractográfico.

Se realizó un estudio fractográfico mediante el microscopio electrónico de barrido sobre las superficies de rotura. Para este estudio se eligió una de las alúminas, el A94, y los dos carburos, el SIC y el B4C, ya que no se pretendió realizar un análisis exhaustivo de todos los materiales, sino evaluar las posibles diferencias entre los distintos tipos de ensayo, analizar el mecanismo de fallo e identificar el tipo de rotura predominante en estos materiales. Las muestras se eligieron entre los tres métodos de ensayo, los ensayos de compresión diametral estáticos, los dinámicos y los de tracción uniaxial por "spalling" de forma aleatoria, ya que a simple vista todas las superficies de rotura presentaron aspectos similares.

Las fotografías se muestran a continuación, y de todas ellas se extrajeron las siguientes observaciones. En primer lugar no se apreció ninguna diferencia en el mecanismo de rotura al comparar las imágenes de los diferentes tipos de ensayo. También se observa la ausencia de deformación plástica en todos los materiales y tipos de ensayo, siendo una rotura frágil. Este tipo de rotura es característico de los materiales cerámicos y permite afirmar que el material rompe cuando aún se encuentra en régimen elástico. En las imágenes se aprecian marcas de clivaje distribuidas por la superficie de fractura. Este mecanismo, característico de los materiales frágiles, suele estar asociado a criterios de rotura de tipo tensional. También se aprecia que aunque alguna rotura se produce siguiendo las líneas de borde de grano, la rotura predominante es de tipo transgranular.

Como consecuencia de todas estas observaciones, puede considerarse razonable realizar la hipótesis de un material elástico y lineal con fallo cuando se alcanza una condición límite de las tensiones.

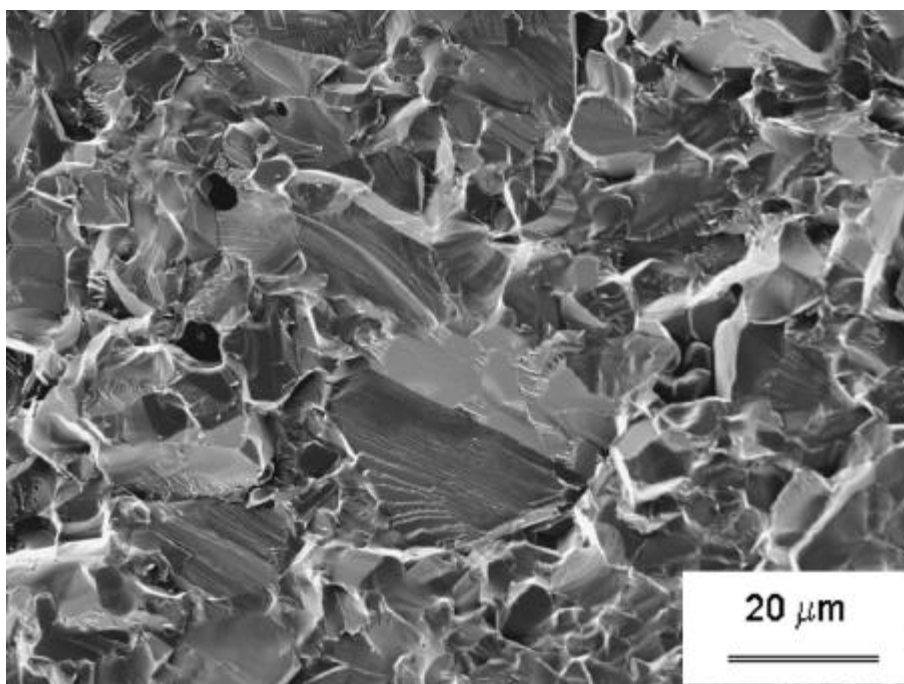


Figura 4.16. Fotografía a 1000 aumentos de la superficie de fractura de un ensayo de compresión diametral estático de A94.

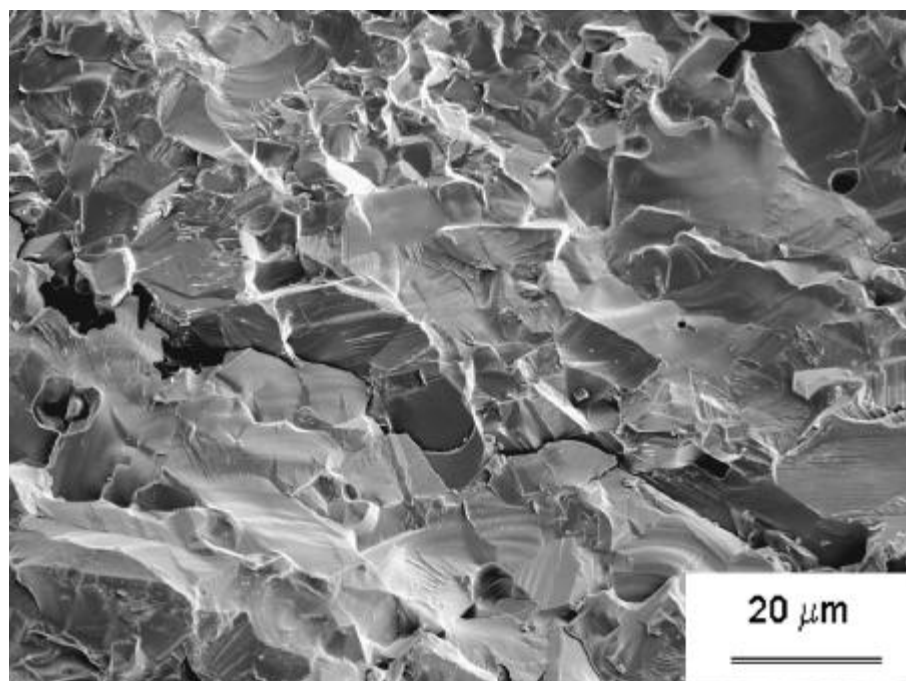


Figura 4.17. Fotografía a 1000 aumentos de la superficie de fractura de un ensayo de tracción uniaxial por "spalling" de A94.

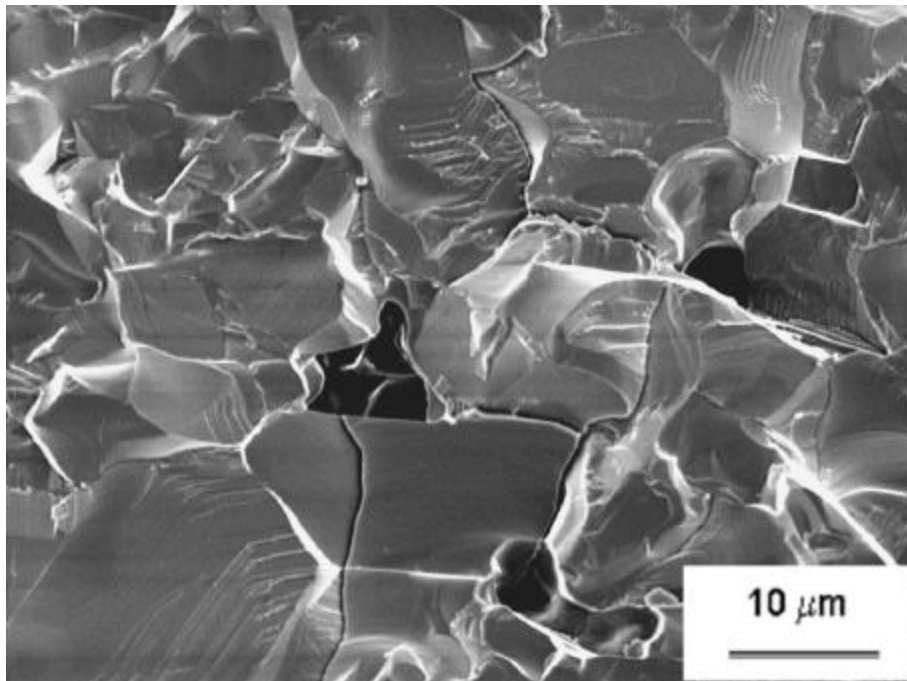


Figura 4.18. Fotografía a 2000 aumentos de la superficie de fractura de un ensayo de tracción uniaxial por "spalling" de A94. Se aprecian fisuras perpendiculares a la fisura principal.

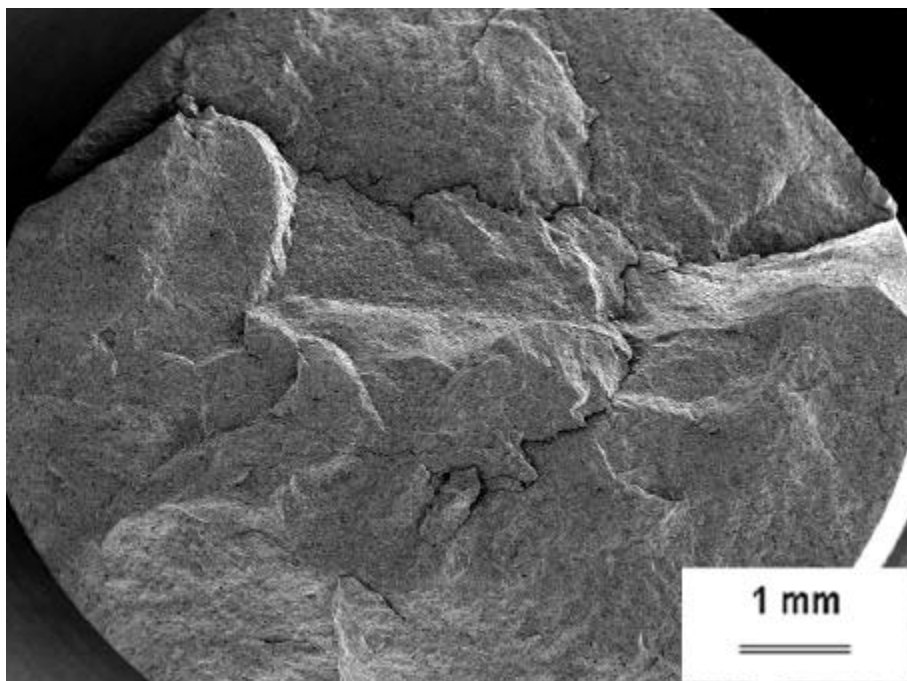


Figura 4.19. Fotografía a 15 aumentos de la superficie de fractura de un ensayo de tracción uniaxial por "spalling" de A94.

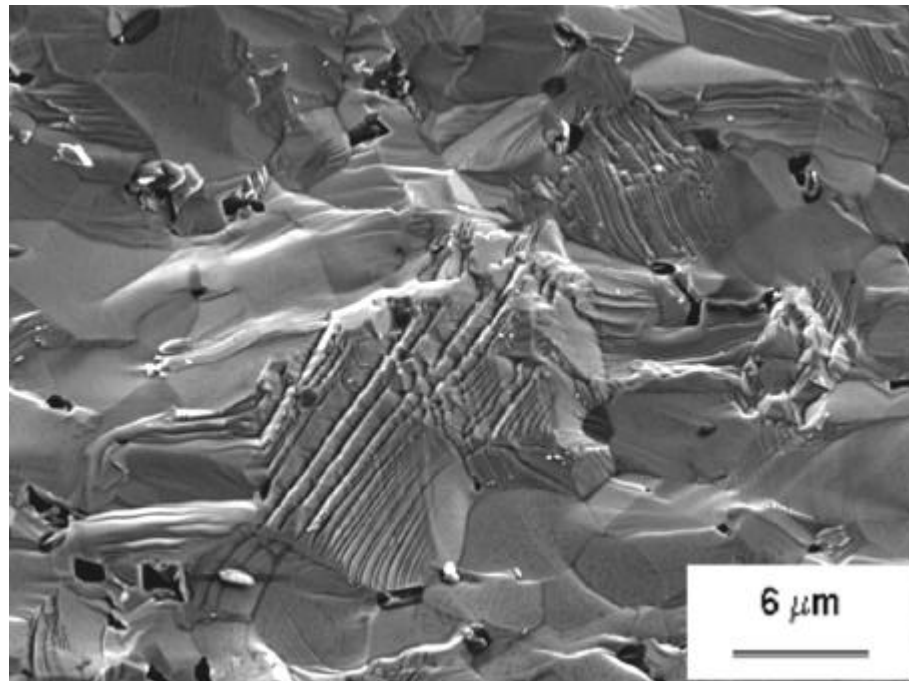


Figura 4.20. Fotografía a 3000 aumentos de la superficie de fractura de un ensayo de compresión diametral dinámico en barra Hopkinson de SIC.

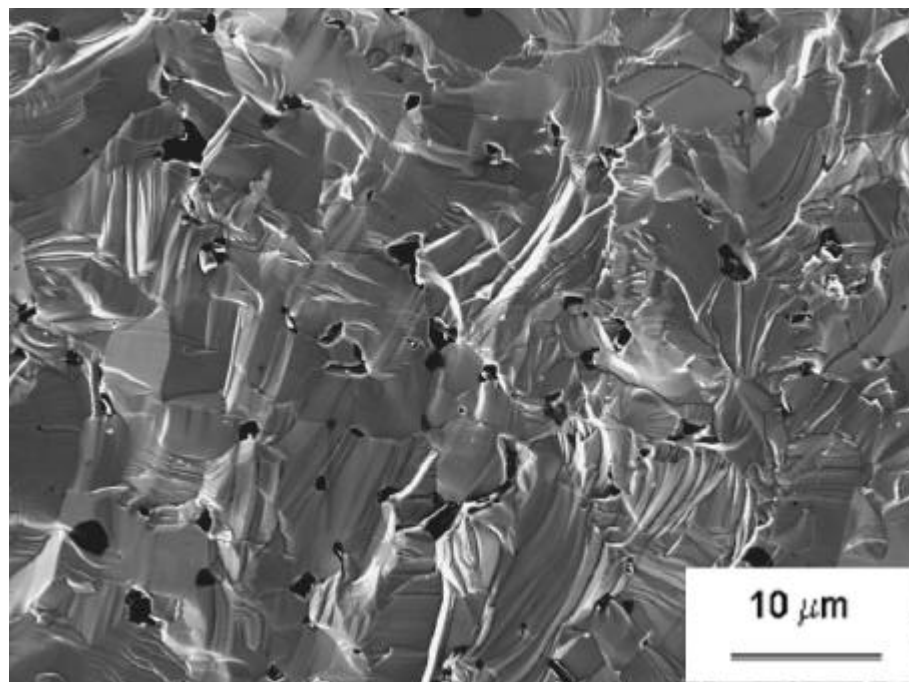


Figura 4.21. Fotografía a 2000 aumentos de la superficie de fractura de un ensayo de tracción uniaxial por "spalling" de SIC.

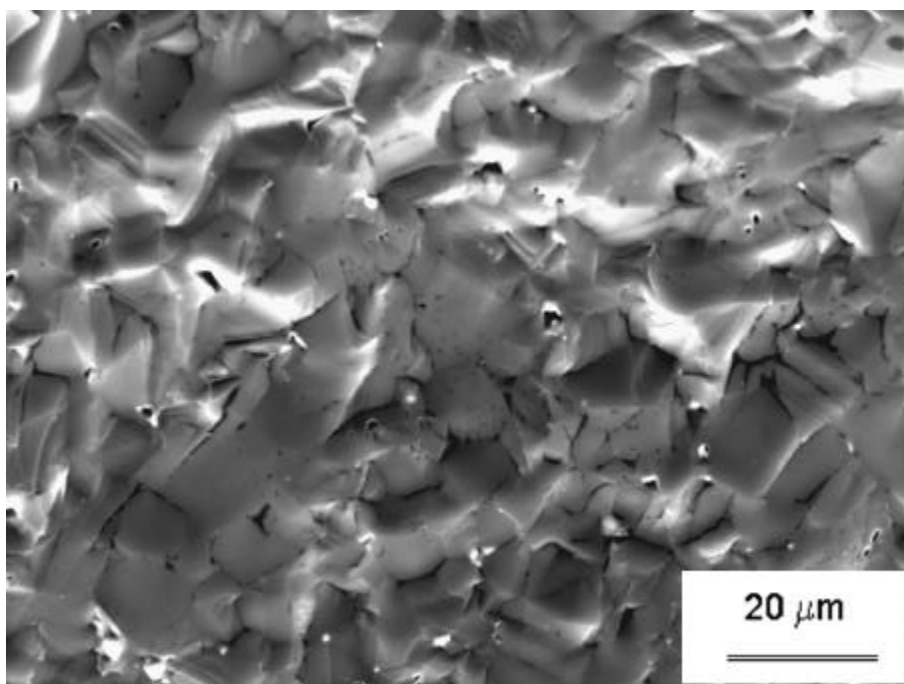


Figura 4.22. Fotografía a 1000 aumentos de la superficie de fractura de un ensayo de compresión diametral estático de B4C.

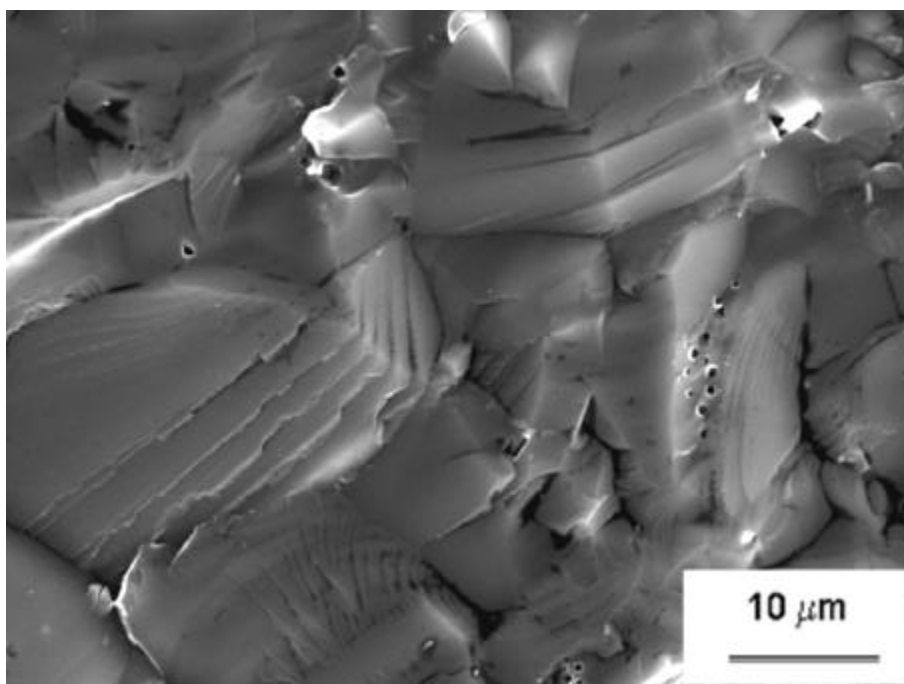


Figura 4.23. Fotografía a 2000 aumentos de la superficie de fractura de un ensayo de tracción uniaxial por "spalling" de B4C.

5 CONCLUSIONES

5.1 Conclusiones

Como objetivos de esta Tesis se habían fijado los siguientes. Diseñar, optimizar y aplicar una nueva técnica experimental que permita determinar la resistencia a tracción de materiales cerámicos avanzados a altas velocidades de deformación bajo estados uniaxiales de carga. Realizar un estudio analítico y numérico del método desarrollado para analizar las condiciones de validez del ensayo. Determinar la resistencia a tracción de distintos materiales cerámicos avanzados, seleccionados entre los de mayor uso en aplicaciones balísticas, mediante uso de esta nueva técnica y el empleo de otras complementarias. Y analizar la influencia de la velocidad de deformación en las propiedades mecánicas de los materiales cerámicos avanzados estudiados. El trabajo realizado en esta Tesis Doctoral puede resumirse en las siguientes conclusiones.

- Se ha desarrollado una nueva técnica experimental, los ensayos de tracción dinámica directa por "spalling", basada en la propagación y reflexión de ondas elásticas en materiales frágiles, que proporciona la resistencia a tracción en condiciones de carga uniaxial y dinámica. Se ha comprobado que es un procedimiento fiable, con ventajas frente a otros tipos de ensayos.
- Este método experimental se ha estudiado a fondo probándose su validez mediante estudios analíticos y numéricos.
- La técnica original de tracción dinámica uniaxial por "spalling" se ha empleado en la caracterización de tres alúminas de distintos grados de pureza, un compuesto de alúmina y zirconia, carburo de silicio y carburo de boro. Así mismo, se ha generado una base de datos sobre las propiedades mecánicas de estos materiales.

- Se han realizado ensayos de compresión diametral a velocidades de deformación bajas mediante máquinas servohidráulicas convencionales, y a velocidades de deformación altas mediante la técnica de la barra Hopkinson, aportándose una base de datos de los materiales mencionados.
- Se ha llevado a cabo una comparación entre los distintos ensayos realizados, así como un análisis de la influencia de la velocidad de deformación de los materiales estudiados. Se ha comprobado que la resistencia a tracción es una propiedad sensible a la velocidad de deformación en estos materiales, aumentando cuando se eleva la velocidad de aplicación de las cargas.

Se considera que los objetivos fijados al comienzo de la investigación han sido alcanzados en gran medida. Con el estudio realizado en esta Tesis se pretende rellenar una laguna importante para la simulación numérica y el diseño de procesos dinámicos sobre estos materiales, al desarrollar una nueva técnica experimental que proporciona una buena medida de la resistencia a tracción dinámica en condiciones de carga uniaxial, ya que hasta el momento no existía una técnica fiable para determinar esta propiedad. La metodología experimental de esta Tesis así como la base de datos aportada, se consideran unas buenas herramientas para el diseño de protecciones basadas en materiales cerámicos.

5.2 Trabajo futuro

Como trabajo futuro se propone ampliar la base de datos, extendiendo el estudio experimental a otros materiales cerámicos mediante la nueva técnica experimental. Las propiedades mecánicas a altas velocidades de deformación de materiales como el diboruro de titanio, nitruro de silicio o diversos materiales compuestos de matriz cerámica han sido apenas estudiadas a fondo y escasean resultados experimentales que aporten información sobre su comportamiento.

Así mismo, se cree oportuno profundizar en el ensayo de compresión dinámica de materiales cerámicos a diferentes velocidades de deformación, puesto que esta información es esencial para el desarrollo de criterios de rotura.

Se ha demostrado que en la nueva técnica experimental no es necesaria la instrumentación directa de las probetas. Gracias a ello sería posible realizar los ensayos en diferentes condiciones ambientales. Por este motivo otra línea de trabajo futuro que se propone es la realización de los ensayos dinámicos de tracción directa por "spalling" a elevadas temperaturas para evaluar la influencia de la temperatura en la resistencia a tracción dinámica.

Finalmente se cree conveniente ampliar el estudio de los criterios de rotura de estos materiales, analizando los efectos producidos por la velocidad de deformación y la temperatura.

6 BIBLIOGRAFÍA

- Adams M. Sines G. "Methods for determining the strength of brittle materials in compressive stress states", Journal of testing and evaluation, JTEVA, Vol 4, No 6, pp 383-396, Jan. 1976
- Adams J.H. Anschuetz B. "Ceramic cutting tools". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.
- Albertini C., Montagnani M. "Testing techniques based on the Split Hopkinson Bar". Mechanical properties at high rates of strain. Ed. J.Harding. London, 1974
- Anderson Jr. C. E., Morris, B. L. "The ballistic performance of confined Al_2O_3 ceramic tiles". Int. J. Impact Engng. Vol 12, No 2, pp 167-187, 1992.
- Anderson Jr. C. E., Walker J. D., Lankford J. "Investigations of the ballistic response of brittle materials". Technical Report SwRI Project 06-5117/002. November 1995.
- ASTM-E112, "Standard test methods for determining average grain size". Annual book of ASTM standards, ASTM, Philadelphia, 1988.
- Bathe K.J. "Finite element procedures in engineering analysis". Ed. Prentice-Hall. London, 1982.
- Chen W., Subhash G., Ravichandran G. "Evaluation of ceramic specimen geometry used in split Hopkinson pressure bar". Dymat journal, n°3, september 1994, 193-210.

- Chocron Benloulou I. S., Sánchez Gálvez V. "A new analytical model to simulate impact onto ceramic composite armours". *Int. J. Impact Engng.* Vol 21, No 6, pp 461-471, 1998
- Cortés R., Navarro C. Martínez M.A., Rodríguez J. Sánchez GálvezV. "Numerical modelling of normal impact on ceramic composite armours" *Int. J. of Impact Engng.* Vol. 12 No. 4 pp. 639-651, 1992.
- Cranmer, C. "Overview of technical, engineering and advanced ceramics". *Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses.* Vol. 4, ASM International, 1991.
- Curran D. R., Seaman L., Cooper T., Shockey D. A. "Micromechanical model for comminution and granular flow of brittle material under high strain rate application to penetration of ceramic targets". *Int. J. Impact Engng.* Vol 13, No 1, pp 53-83, 1993
- Den Reijer, P. C. "Impact on ceramic faced armours", Ph. D. Thesis, Delft University of Technology, 1991.
- Ferber M.K., Tennery V.J. "Structural applications for technical, engineering, and advanced ceramics". *Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses.* Vol. 4, ASM International, 1991.
- Field J.E. "Investigation on the impact performance of various glass and ceramic systems". Final report. Contract D A, JA45-85-C-0021, Cavendish Laboratory, Cambridge England, 1985.
- Freiman, W. "Introduction to ceramic and glasses". *Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses.* Vol. 4, ASM International, 1991.

- Fried I. "Numerical solutions of differential equations". Academic Press. New York, 1967.
- Gálvez Díaz-Rubio F., Rodríguez J., Sánchez-Gálvez, V. "Tensile Strength Measurements of Ceramic Materials at High Rates of Strain". Journal de Physique IV, Colloque C3 Supplément au Journal de Physique III, n°7, pp.151-156 d'Août 1997.
- Gorham, D.A. "Measurements of stress-strain properties of strong metals at very high rates of strain". Mechanical properties at high rates of strain. Ins. Phys. Conf., Ser. No. 47, 1. 1979.
- Grandin Jr. H. "Fundamentals of the finite element method". Ed. McMillan. New York, 1986.
- Greenhut V.A. "Characterization of ceramics and glasses: An overview". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.
- Harding J., Wood E.D., Campbell J.D. "Tensile testing of materials at impact rates of strain". J. Mech. Engng. Sci., Vol. 2, pp. 1-9, 1960.
- Hare "Ceramics. Properties and applications". Encyclopedia of Glass, Ceramics and Cement. Ed. Martyn Grayson. John Willey and Sons, 1984.
- Hench L.L. "Medical and scientific products". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.
- Holmquist T. J., Johnson G. R., Grady D. E., Lopatin C. M., Hertel Jr. E. S. "High strain rate properties and constitutive modelling of glass. ". 15th

International Symposium on Ballistics. Jerusalem, Israel, 21-24 May, 1995.

Hopkinson B. "A method of measuring the pressure produced in the detonation of explosives or by the impact of bullets". Phil. Trans. A., Vol.213, P.437, 1913.

Johnson, W. Impact Strength of Materials. Ed. Arnold, London, 1972

Johnson G. R., Holmquist T. J. "A computational constitutive model for brittle materials subjected to large strains, high strain rates and high pressures. ". Shock Wave and High Strain Rate Phenomena in Materials. pp 1075-1081. M.A. Meyers, L.W. Murr and K.P. Staudhammer (eds.). Marcel Dekker, 1992.

Johnson G. R., Holmquist T. J. "An improved computational constitutive model for brittle materials". Joint AIRAP/APS Conference, Colorado Springs, Colorado, June 1993.

Kamo R. "Adiabatic diesel engines". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.

Kipp M. E., Grady D. E., Wise J. L. "Planar shock and penetration response of ceramics". Shock Wave and High Strain Rate Phenomena in Materials. pp 1083-1091. M.A. Meyers, L.W. Murr and K.P. Staudhammer (eds.). Marcel Dekker, 1992.

Kolsky H. "An investigation of the mechanical properties of materials at very high strain rates". Proc. Royal Soc. B. Vol.62 p.676, 1949.

Kolsky H. "Stress waves in solids". Dover Publications Inc. New York, 1963.

- Lankford J. "Compressive strength and microplasticity in polycrystalline alumina" J. Mat. Sci., 12, pp.791-796, 1977.
- Lankford J. "Tensile failure of unflawed polycrystalline Al_2O_3 " J. Mat. Sci., 13, pp.351-357, 1978.
- Lankford J. "Temperature-strain rate dependence of compressive strength and damage mechanisms in aluminium oxide" J. Mat. Sci., 16, pp.1567-1578, 1981.
- Lataillade J.L., Gillaizeau F., Skhiri N., El Bounia N. "Thermomechanical investigation of alumina at high strain rates" Proc. of the Int. Symp. on Intense Dynamic Loading and its Effects. Beijing, China, 1986.
- Lee W.E. Rainforth W.M. " Ceramic Microstructures". Ed. Chapman & Hall. Londres 1994.
- Lehman R.L "Overview of ceramic design and process engineering". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.
- Levine S.R. Herbell T.P. "Aerospace applications". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.
- Lindholm U.S., Yeakley L.M. "High strain rate testing: Tension and compression". Exp. Mech., Vol. 8, pp. 1-9, 1968
- Lindholm U. S. "High strain rate tests". Techniques of metals research. Capítulo 5, apéndice A. Vol. 5, Pt. 1 Ed. R. F. Bunshah., John Willey & Sons, 1971.

- Louro, L. H. L., Meyers M. A. "Effect of stress state and microstructural parameters on impact damage of alumina-based ceramics". J. Mat. Sci. 24, pp 2516-2532, 1989.
- Maiden, C. J. Green S. J. "Compressive strain rate test on six selected materials at strain rates from 10^{-2} to 10^1 in/in/sec". J. Of Appl. Mech., 33, 496, 1966.
- Margolin L.G. "A generalised Griffith criterion for crack propagation" Engng. Fract. Mech., Vol. 19, p. 539, 1984.
- Mescall J.F. Tracy C.A. "Improved modelling of fracture in ceramic armours". Army Science Conference Proceedings, West Point, NY, 1986.
- Meyers M.A. "Dynamic failure: mechanical and microstructural aspects". Colloque C8 Supplément au Journal de Physique III, nº4, pp.597-621 septembre 1994.
- Navarro C., Martínez M. A., Cortés R., Sánchez-Gálvez V. "Some observations on the normal impact on ceramic faced armorers backed by composite plates". Int. J. Impact Engng. Vol 13 No 1, pp 145-156, 1993a
- Navarro C., Martínez M.A., Cortés R., Sánchez Gálvez V. "The performance of lightweight ceramic faced armours under ballistic impact". 14th. International Symposium on Ballistics, Vol. 2, pp. 573-582, 1993b
- Neville A.M. "Properties of concrete". Pitman publishing. 1973.

- Nicholas "Dynamic tensile testing of structural materials using a Split Hopkinson Bar apparatus". Technical report AFWAL-TR-80-4053. 1980
- Ovri J.E.O., Davies T. J. "Diametral compression of silicon nitride". Materials science and engineering. 96, pp 109-116, 1987.
- Quinn G. "Flexural strength of advanced structural ceramics: A Round Robin". J. Am. Ceram. Soc., 73 , [8] pp 2374-2384, 1990.
- Quinn G.D. "Strength and proof testing". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.
- Rajendran A.M., Cook W.H. "A comprehensive review of modelling of impact damage in ceramics". University of Dayton Report UDRI-TR-88-125, Octubre, 1988
- Rajendran A. M. "Modelling the impact behavior of AD85 ceramic under multiaxial loading". Int. J. Impact Engng. Vol 15, No 6, pp 749-768, 1994.
- Rajendran A. M., Grove D.J. "Modelling the shock response of silicon carbide and titanium diboride". Int. J. Impact Engng. Vol 18, No 6, pp 611-631, 1996.
- Ravid M., Bodner S.R. "Dynamic perforation of viscoplastic plates by rigid projectiles". Int. Engng. Sci., 27, pp. 577-591, 1982
- Richlen S.L. Parks Jr. W.P. "Heat exchangers". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.

- Richtmeyer R.D. "Difference methods for initial value problems". John Willey and Sons. New York, 1967.
- Rinehart J. S. "Stress transients in solids". Ed. HyperDynamics. Santa Fe, New Mexico, 1975.
- Rocco P. C. "Influencia del tamaño y mecanismos de rotura del ensayo de compresión diametral", Tesis Doctoral, Departamento de Ciencia de Materiales, Universidad Politécnica de Madrid, 1996.
- Rodríguez J., Navarro C., Sánchez-Gálvez, V. "Splitting tests: an alternative to determine the dynamic tensile strength of ceramic materials". Journal de Physique IV, Colloque C8 Supplément au Journal de Physique III, n°4, pp.101-106 septembre 1994.
- Rosemberg Z., Brar N.S., Bless S.J. "Dynamic high pressure properties of AlN ceramic as determined by flyer plate impact" J. Appl. Phys. 70, (1) pp167-171, 1991
- Rosemberg Z. "The dynamic response of ceramics to shock wave loading". Shock and Impact on Structures. pp. 73-105. C.A. Brebbia, V. Sánchez-Gálvez (eds.). Computational Mechanics Publications, 1994.
- Sánchez Gálvez V. "Fractura dinámica de materiales cerámicos avanzados". XV Encuentro de Mecánica de Fractura, Zamora 1998.
- Shields J.E. "Porosity, density and surface area measurements". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.

- Sibold J.D. "Wear applications". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.
- Smyth J.R. "Advanced gas turbines". Engineered Materials Handbook, Ceramic and Glasses. Vol. 4, ASM International, 1991.
- Staehler J. M., Predebon W. W., Pletka B. J., Lankford J. "Testing of high strength ceramics with the split Hopkinson pressure bar". J. Am. Ceram. Soc. 76 [2] 536-38. 1993.
- Steinberg D. "Computer studies of dynamic strength of ceramics". Lawrence Livermore National Laboratory Report No. UCRL-ID-106004, 1990
- Timoshenko S., Goodier J. N. "Teoría de la elasticidad" Ed. Urmo. Bilbao, 1972.
- Tracy C. A. "A compression test for high strength ceramics", Journal of testing and evaluation, JTEVA, Vol 15, No 1, pp 14-19, Jan. 1987
- Viechnicki D.J., Slavin M.J., Kliman M.I. "Developement and current status of armor ceramics" Ceramic Bulletin Vol.70, No.6, pp.1035-1039, 1991
- Walker J. D., Anderson Jr. C. E. "A time-dependent model for long rod penetration". Int. J. Impact Engng. Vol 16, No 1, pp 19-48, 1995
- Walker J. D., Anderson Jr. C. E. "An analytical model for ceramic-faced light armors". 16th International Symposium on Ballistics. San Francisco, 23-28 September, 1996.

Wilkins M.L., Cline C.F., Honodel C.A. "4th progress report on light armour program" Lawrence Livermore National Laboratory Report No. UCRL-50694, 1969

Wilkins M.L., Landingham R.L., Honodel C.A. "5th progress report on light armour program". Lawrence Livermore National Laboratory Report No. UCRL-50980, 1971

Woorward R. L. "A simple one-dimensional approach to modelling ceramic composite armour defeat". Int. J. Impact Engng. Vol 9, No 4, pp 455-474, 1990.

Wulf, G.L. "Dynamic stress-strain measurements at large strains". Mechanical properties at high rates of strain. Ins. Phys. Conf., Ser. No. 21, London. 1974.

Yaziv D. "Shock fracture and recompaction of ceramics", Ph. D. Thesis, University of Dayton Research Institute, Ohio. 1985.

Zaera R., Sánchez Gálvez V. "Analytical modelling of normal and oblique ballistic impact on ceramic/metal lightweight armours". Int. J. Impact Engng. Vol 21, No 3, pp 133-148, 1998.

Zukas J.A. "High Velocity Impact Dynamics" Ed. John Willey and Sons, 1990


Zukas J.A., Nicholas T., Swift H.F., Greszczuk L.B., Curran D.R. "Impact Dynamics" Ed. John Willey and Sons, 1982.

Apéndice A.

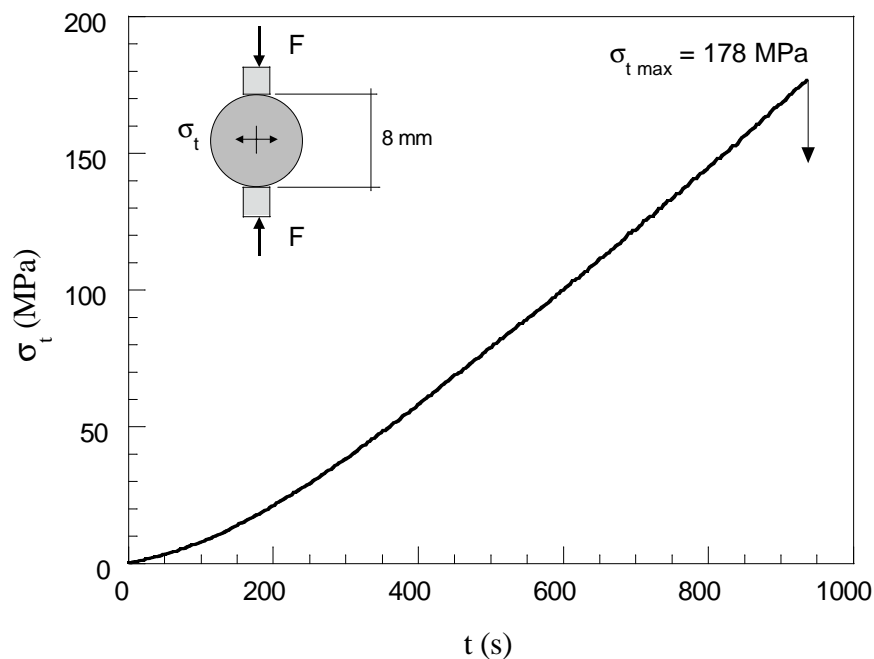
ENSAYOS ESTÁTICOS DE


TRACCIÓN INDIRECTA POR

COMPRESIÓN DIAMETRAL

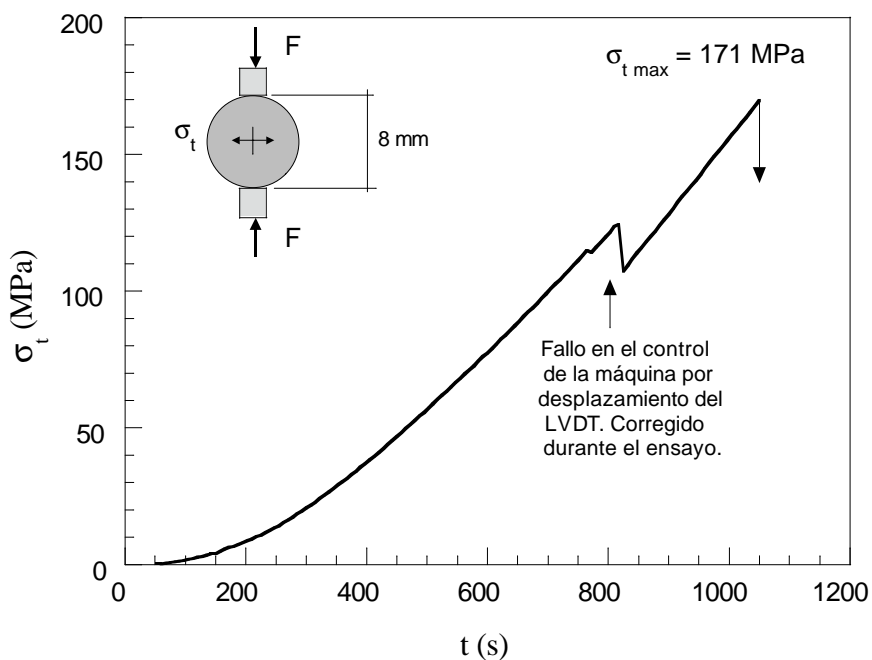
| Código de Ensayo: BLA9401 | |
|--|--|
| Material: AD94 (Alúmina de 94% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 303 GPa Densidad: 3658 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 193 MPa Módulo de rotura (*): 352 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.00 mm Longitud: 4.00 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 15 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 8940 N Resistencia a tracción: 178 MPa Velocidad de carga: 0.217 MPa/s Velocidad de deformación: 7.2·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |


(*) Datos del fabricante.



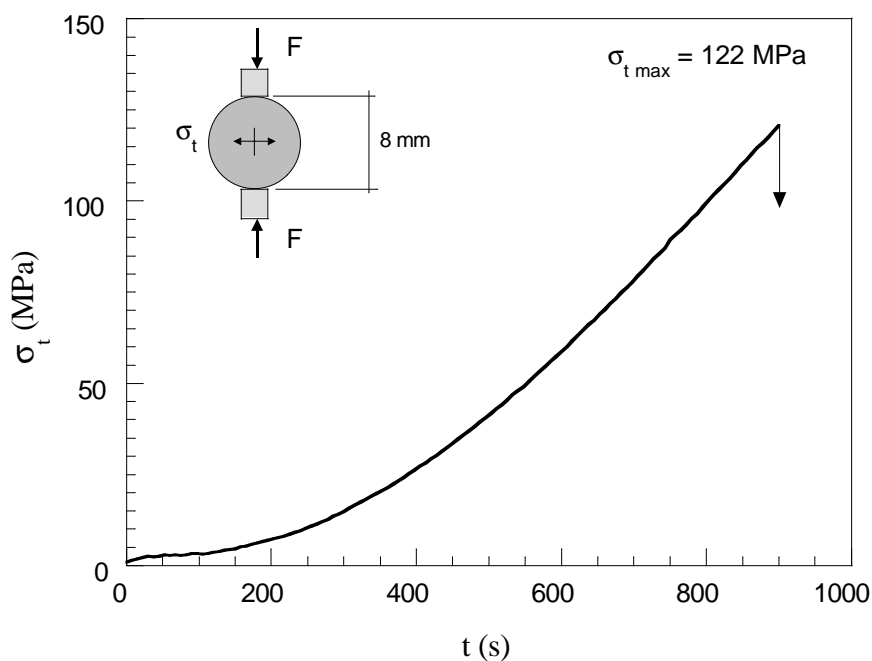
| Código de Ensayo: BLA9402 | |
|---|--|
| Material: AD94 (Alúmina de 94% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 303 GPa Densidad: 3658 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 193 MPa Módulo de rotura (*): 352 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.97 mm Longitud: 4.04 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 16 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor Fallo en el control de la máquina al moverse el LVDT. Corregido durante el ensayo. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 8619 N Resistencia a tracción: 171 MPa Velocidad de carga: 0.276 MPa/s Velocidad de deformación: $9.1 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ | |
|  | |


(*) Datos del fabricante.



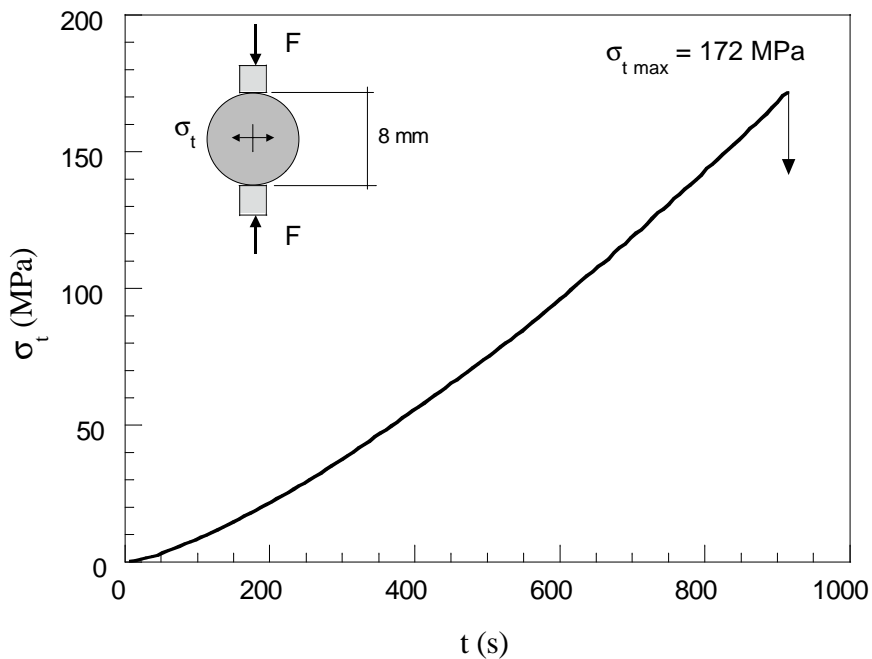
| Código de Ensayo: BLA9403 | |
|--|--|
| Material: AD94 (Alúmina de 94% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas | Propiedades Geométricas |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m ³ | Diámetro: 8.00 mm |
| Resistencia a tracción (*): 193 MPa | Longitud: 3.92 mm |
| Módulo de rotura (*): 352 MPa | |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 16 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 6028 N Resistencia a tracción: 122 MPa Velocidad de carga: 0.208 MPa/s Velocidad de deformación: 6.9·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |


(*) Datos del fabricante.



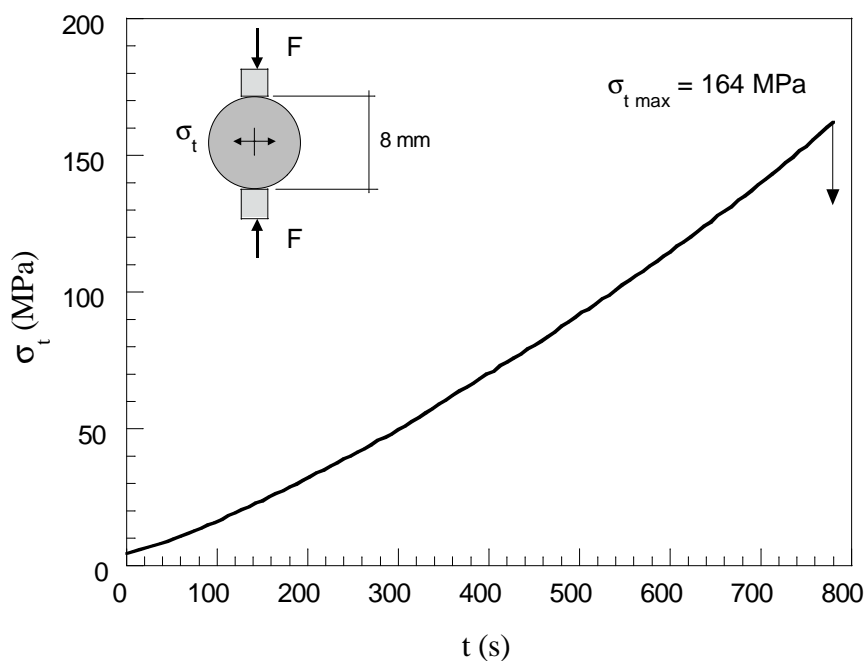
| Código de Ensayo: BLA9404 | |
|--|--|
| Material: AD94 (Alúmina de 94% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 303 GPa Densidad: 3658 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 193 MPa Módulo de rotura (*): 352 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.01 mm Longitud: 3.97 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 16 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 8607 N Resistencia a tracción: 172 MPa Velocidad de carga: 0.240 MPa/s Velocidad de deformación: 9.9·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |


(*) Datos del fabricante.



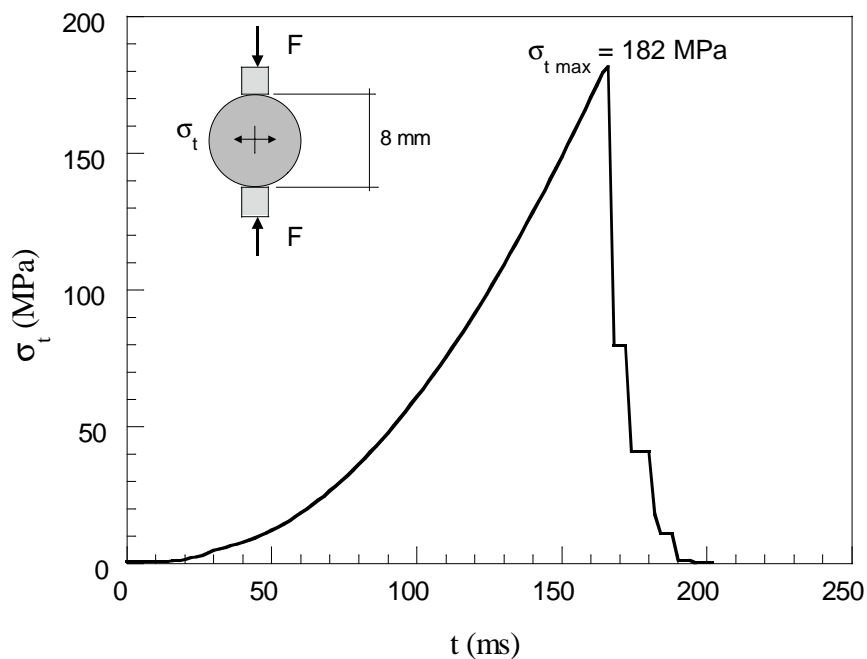
| Código de Ensayo: BLA9405 | |
|--|--|
| Material: AD94 (Alúmina de 94% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 303 GPa Densidad: 3658 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 193 MPa Módulo de rotura (*): 352 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.01 mm Longitud: 4.08 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 16 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 8406 N Resistencia a tracción: 164 MPa Velocidad de carga: 0.253 MPa/s Velocidad de deformación: 8.3·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |


(*) Datos del fabricante.



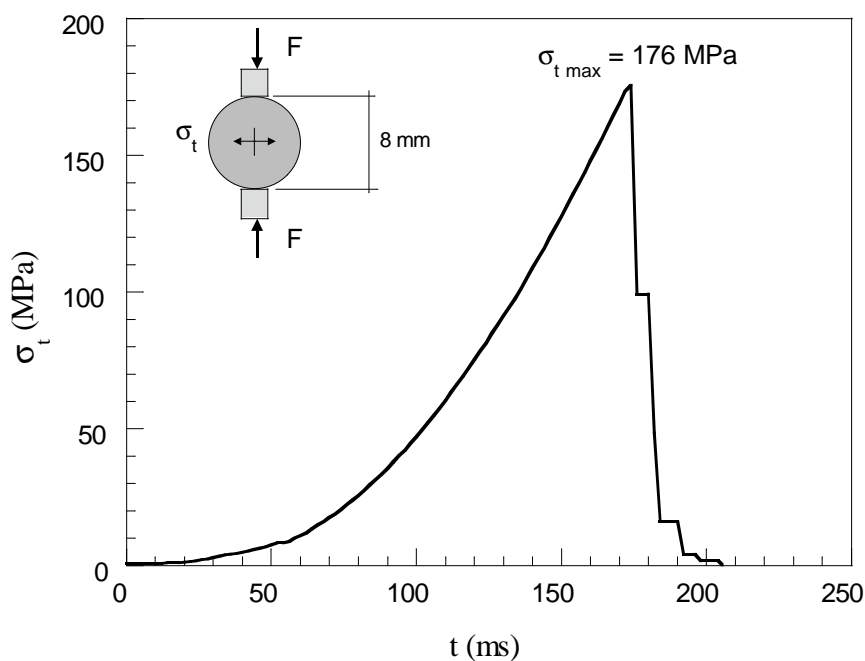
| Código de Ensayo: BMA9401 | |
|--|--|
| Material: AD94 (Alúmina de 94% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 303 GPa Densidad: 3658 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 193 MPa Módulo de rotura (*): 352 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.02 mm Longitud: 3.97 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 16 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 9095 N Resistencia a tracción: 182 MPa Velocidad de carga: 1290 MPa/s Velocidad de deformación: $4.3 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ |  |


(*) Datos del fabricante.



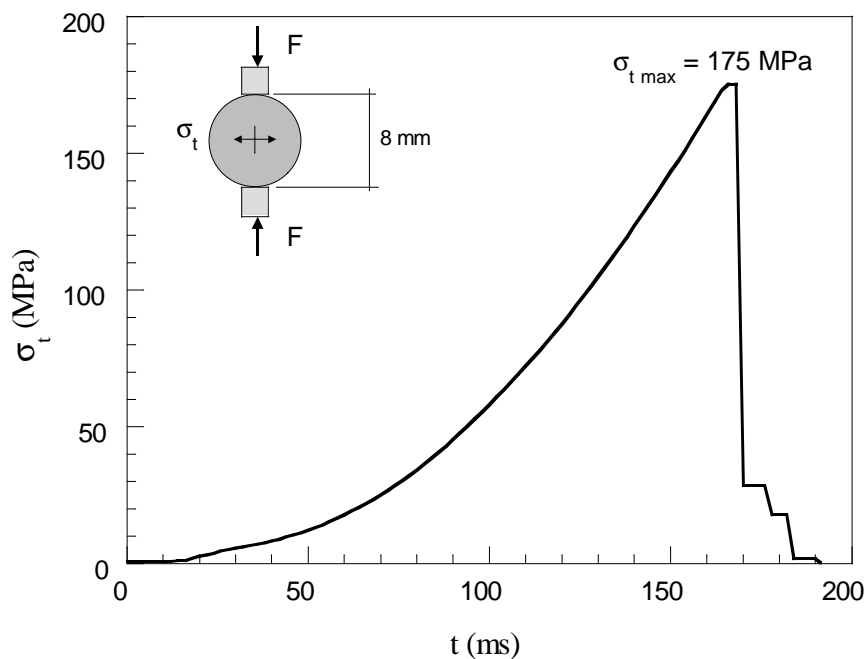
| Código de Ensayo: BMA9402 | |
|---|--|
| Material: AD94 (Alúmina de 94% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 303 GPa Densidad: 3658 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 193 MPa Módulo de rotura (*): 352 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.99 mm Longitud: 3.94 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 16 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 8687 N Resistencia a tracción: 176 MPa Velocidad de carga: 1290 MPa/s Velocidad de deformación: 4.3·10⁻³ s⁻¹ | |
|  | |

(*) Datos del fabricante.

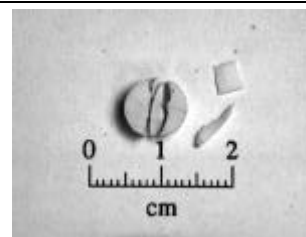


| Código de Ensayo: BMA9403 | |
|---|--|
| Material: AD94 (Alúmina de 94% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas | Propiedades Geométricas |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m ³ | Diámetro: 8.00 mm |
| Resistencia a tracción (*): 193 MPa | Longitud: 3.97 mm |
| Módulo de rotura (*): 352 MPa | |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 16 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 8748 N Resistencia a tracción: 175 MPa Velocidad de carga: 1890 MPa/s Velocidad de deformación: 6.2·10⁻³ s⁻¹ |  |

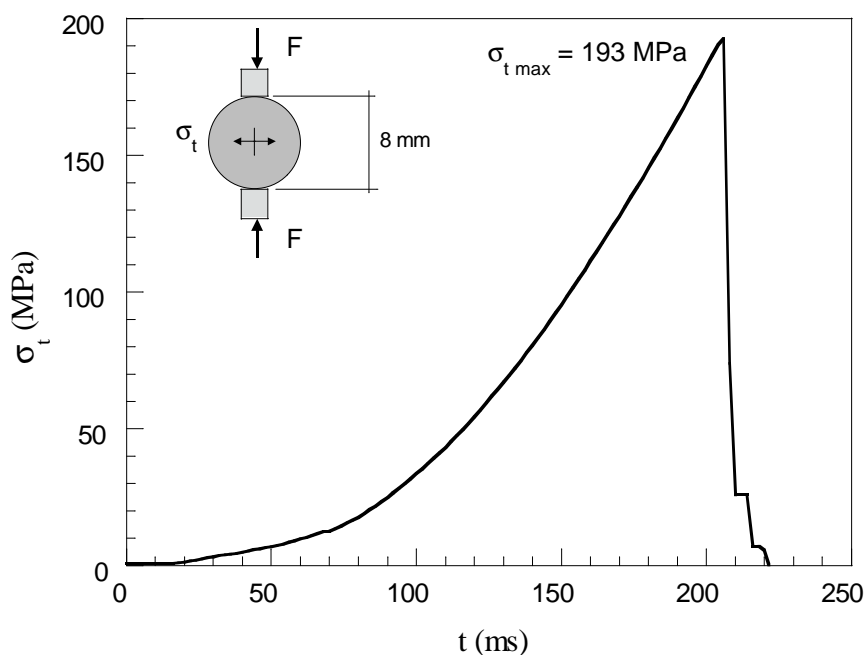
(*) Datos del fabricante.



| Código de Ensayo: BMA9404 | |
|---|--|
| Material: AD94 (Alúmina de 94% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 303 GPa Densidad: 3658 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 193 MPa Módulo de rotura (*): 352 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.00 mm Longitud: 4.01 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 16 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 9706 N Resistencia a tracción: 193 MPa Velocidad de carga: 1720 MPa/s Velocidad de deformación: 5.7·10⁻³ s⁻¹ | |

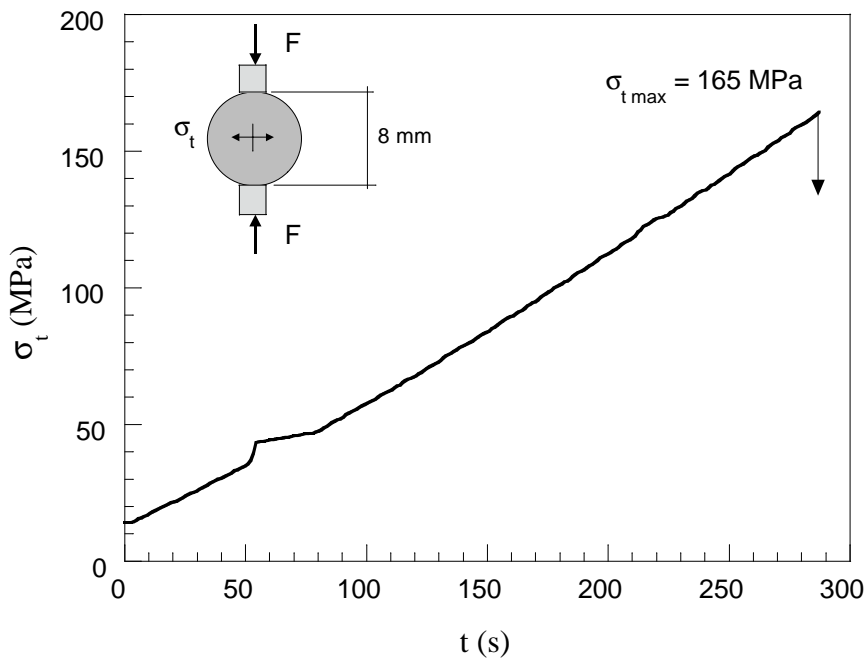


(*) Datos del fabricante.



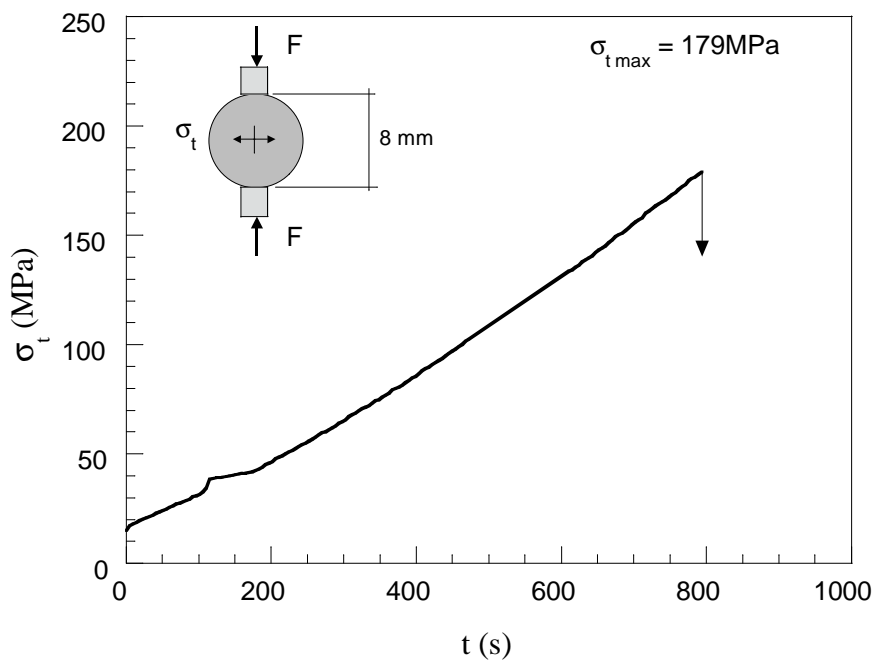
| Código de Ensayo: BLA9801 | |
|--|--|
| Material: AD98 (Alúmina de 98% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 366 GPa Densidad: 3877 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 320 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 19°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.05 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 18920 N Resistencia a tracción: 165 MPa Velocidad de carga: 0.579 MPa/s Velocidad de deformación: $1.6 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ | |

(*) Datos del fabricante.



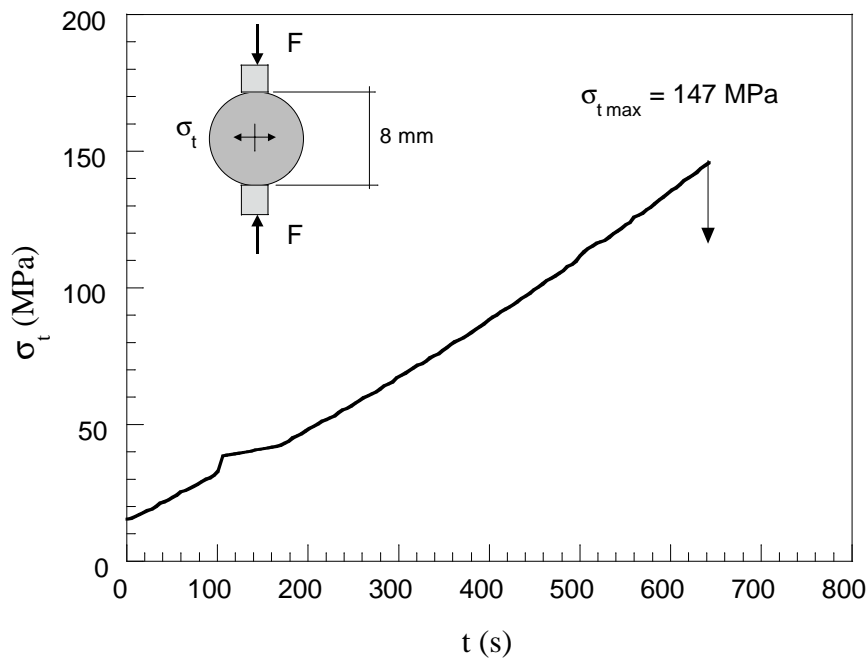
| Código de Ensayo: BLA9802 | |
|--|--|
| Material: AD98 (Alúmina de 98% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 366 GPa Densidad: 3877 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 320 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 19°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.02 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 20620 N Resistencia a tracción: 179 MPa Velocidad de carga: 0.227 MPa/s Velocidad de deformación: $6.2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ | |

(*) Datos del fabricante.



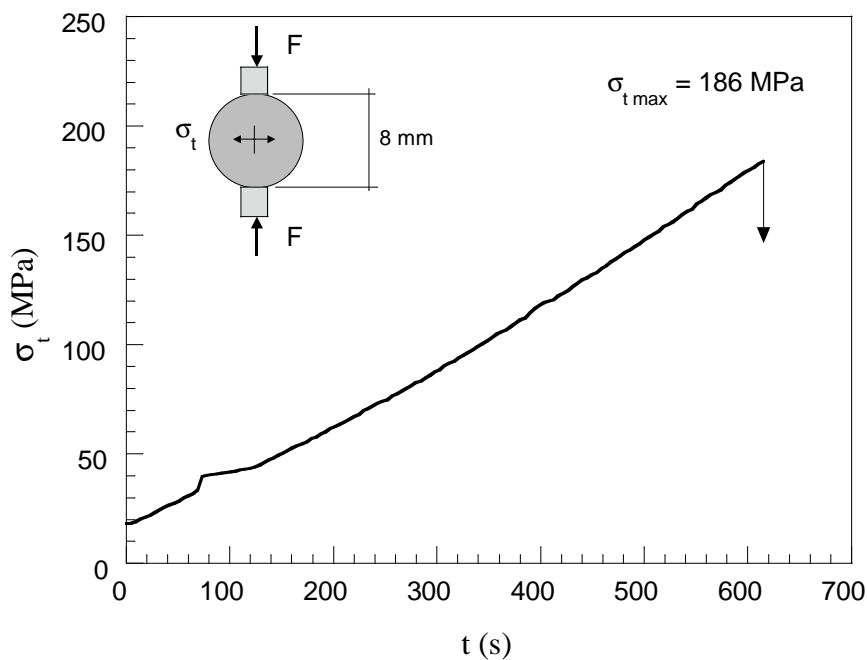
| Código de Ensayo: BLA9803 | |
|---|--|
| Material: AD98 (Alúmina de 98% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 366 GPa Densidad: 3877 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 320 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 19°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.02 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 16870 N Resistencia a tracción: 147 MPa Velocidad de carga: 0.221 MPa/s Velocidad de deformación: 6.0·10⁻⁷ s⁻¹ | |

(*) Datos del fabricante.



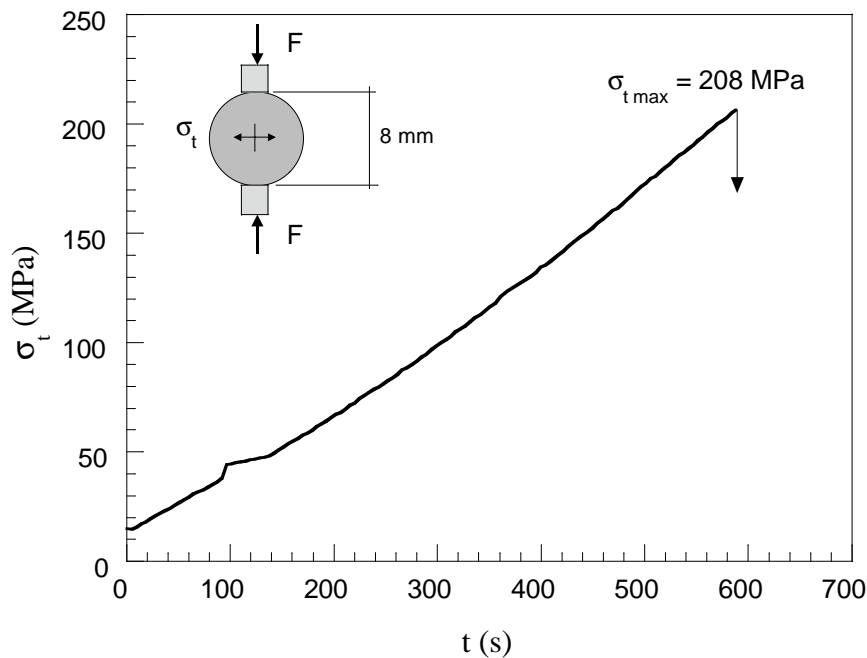
| Código de Ensayo: BLA9804 | |
|--|--|
| Material: AD98 (Alúmina de 98% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 366 GPa Densidad: 3877 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 320 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.025 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 21340 N Resistencia a tracción: 186 MPa Velocidad de carga: 0.292 MPa/s Velocidad de deformación: $8.0 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ | |

(*) Datos del fabricante.



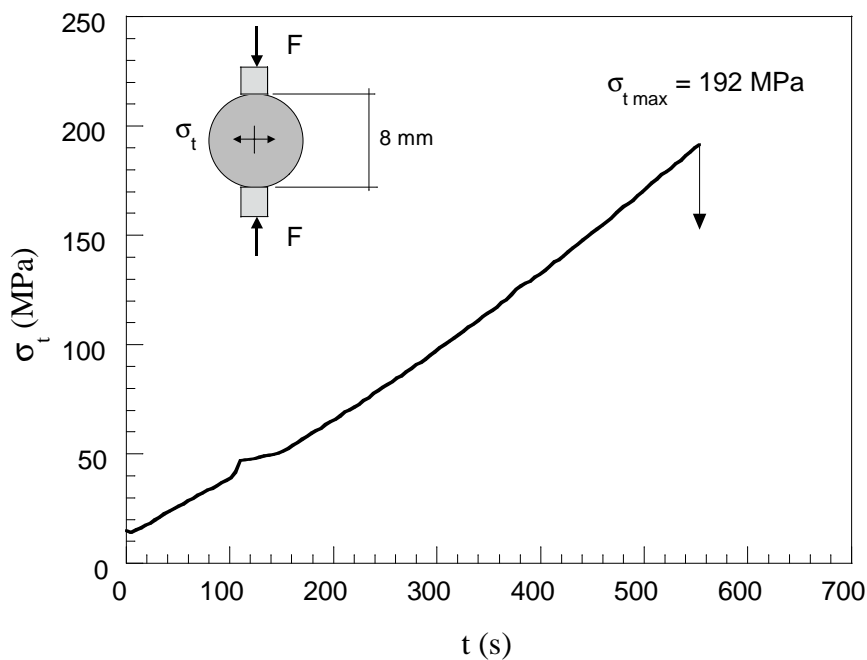
| Código de Ensayo: BLA9805 | |
|--|--|
| Material: AD98 (Alúmina de 98% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas | Propiedades Geométricas |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m ³ | Diámetro: 12.0 mm |
| Resistencia a tracción (*): Sin datos | Longitud: 6.1 mm |
| Módulo de rotura (*): 320 MPa | |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.03 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 23870 N Resistencia a tracción: 208 MPa Velocidad de carga: 0.365 MPa/s Velocidad de deformación: $9.9 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ | |


(*) Datos del fabricante.



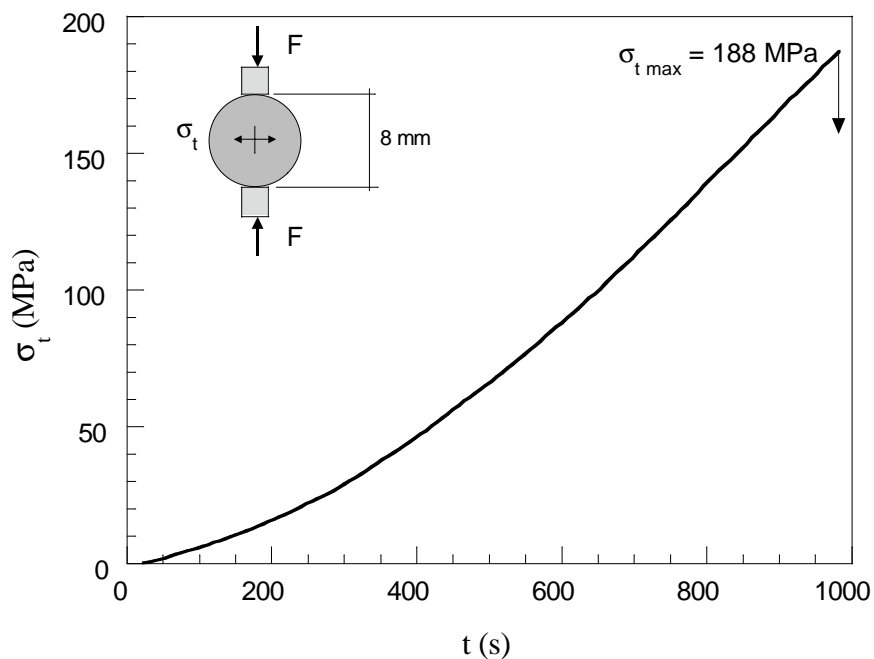
| Código de Ensayo: BLA9806 | |
|--|--|
| Material: AD98 (Alúmina de 98% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 366 GPa Densidad: 3877 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 320 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.03 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 22040 N Resistencia a tracción: 192 MPa Velocidad de carga: 0.340 MPa/s Velocidad de deformación: $9.2 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ | |


(*) Datos del fabricante.



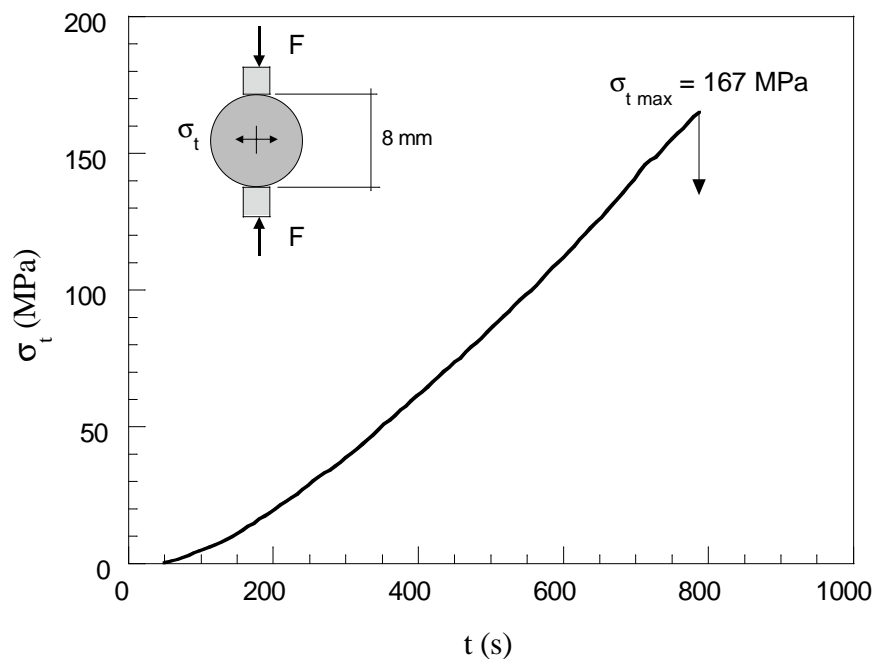
| | |
|--|--|
| Código de Ensayo: BLA9901 | |
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.97 mm Longitud: 3.98 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 17 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 9375 N Resistencia a tracción: 188 MPa Velocidad de carga: 0.265 MPa/s Velocidad de deformación: 6.8·10⁻⁷ s⁻¹ |  |


(*) Datos del fabricante.



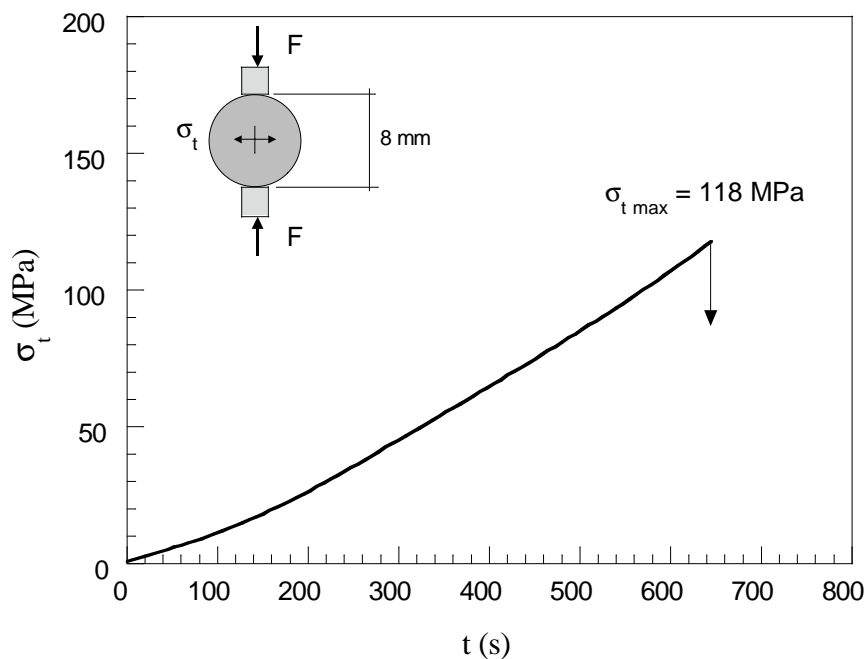
| Código de Ensayo: BLA9902 | |
|--|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.96 mm Longitud: 3.57 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 18 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 7454 N Resistencia a tracción: 167 MPa Velocidad de carga: 0.285 MPa/s Velocidad de deformación: 7.3·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |


(*) Datos del fabricante.



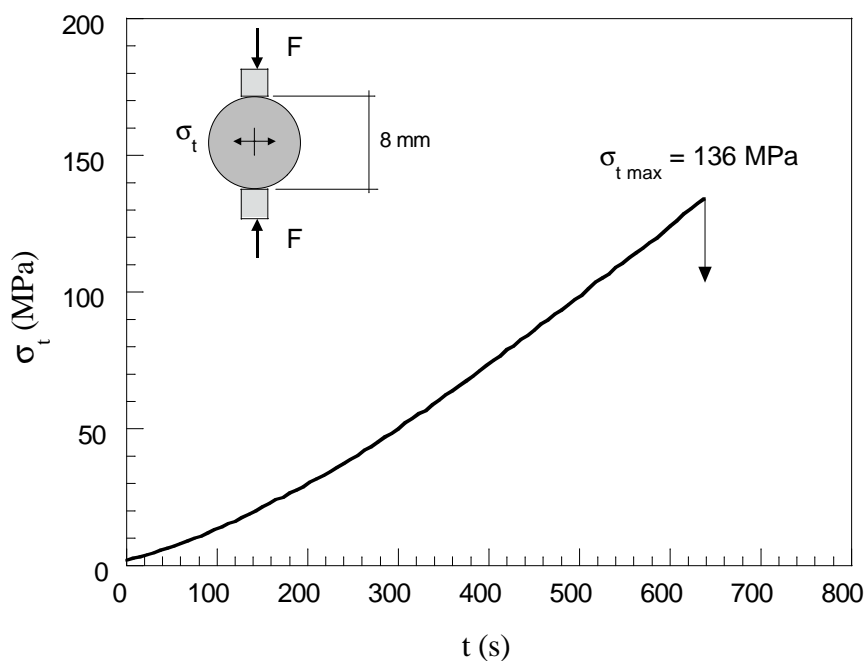
| Código de Ensayo: BLA9903 | |
|--|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.95 mm Longitud: 3.94 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 18 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 5820 N Resistencia a tracción: 118 MPa Velocidad de carga: 0.211 MPa/s Velocidad de deformación: 5.4·10⁻⁷ s⁻¹ |  |


(*) Datos del fabricante.



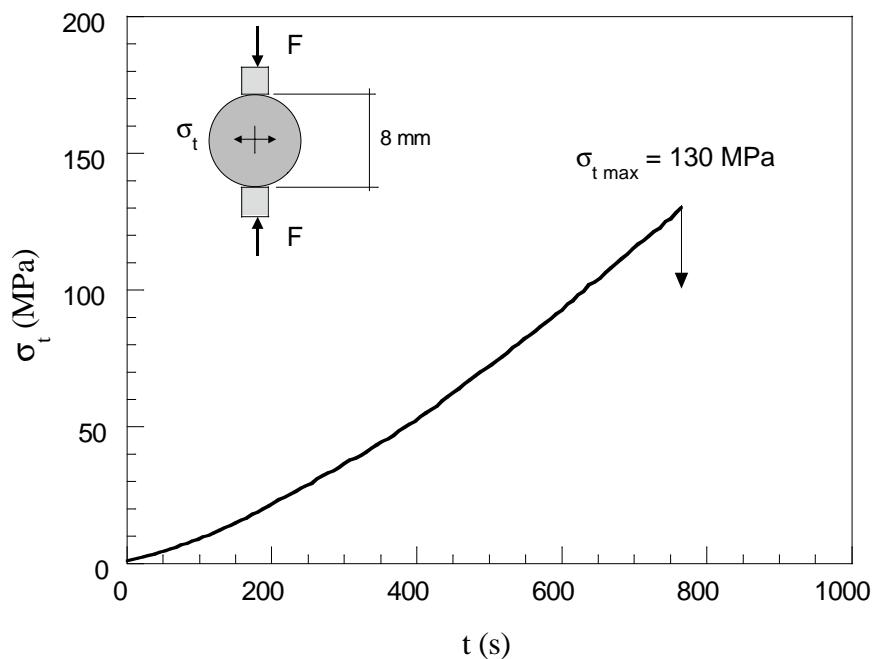
| Código de Ensayo: BLA9904 | |
|--|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.95 mm Longitud: 3.55 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 18 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 6043 N Resistencia a tracción: 136 MPa Velocidad de carga: 0.252 MPa/s Velocidad de deformación: 6.4·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |

(*) Datos del fabricante.



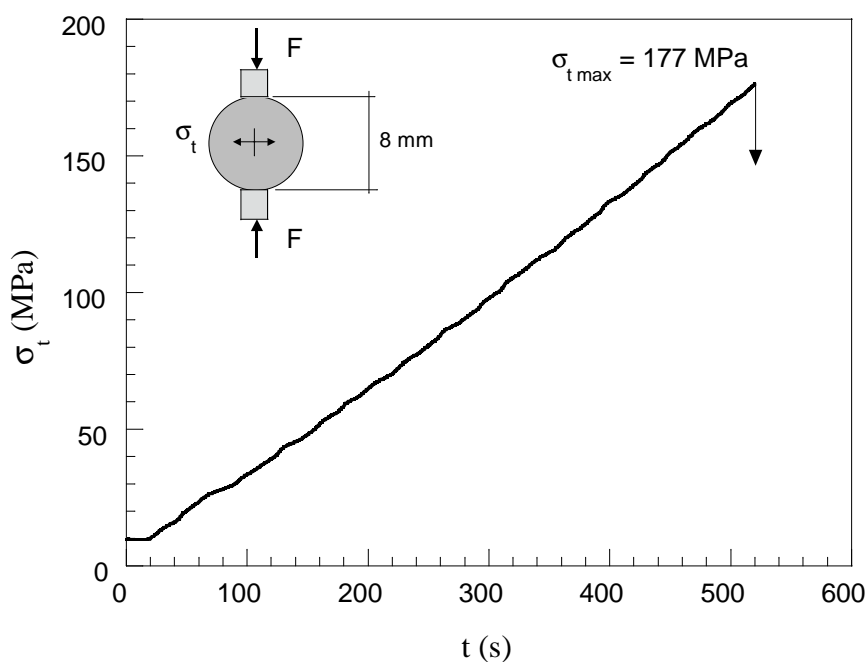
| Código de Ensayo: BLA9905 | |
|--|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.96 mm Longitud: 3.98 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 18 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 6489 N Resistencia a tracción: 130 MPa Velocidad de carga: 0.211 MPa/s Velocidad de deformación: 5.4·10⁻⁷ s⁻¹ |  |

(*) Datos del fabricante.



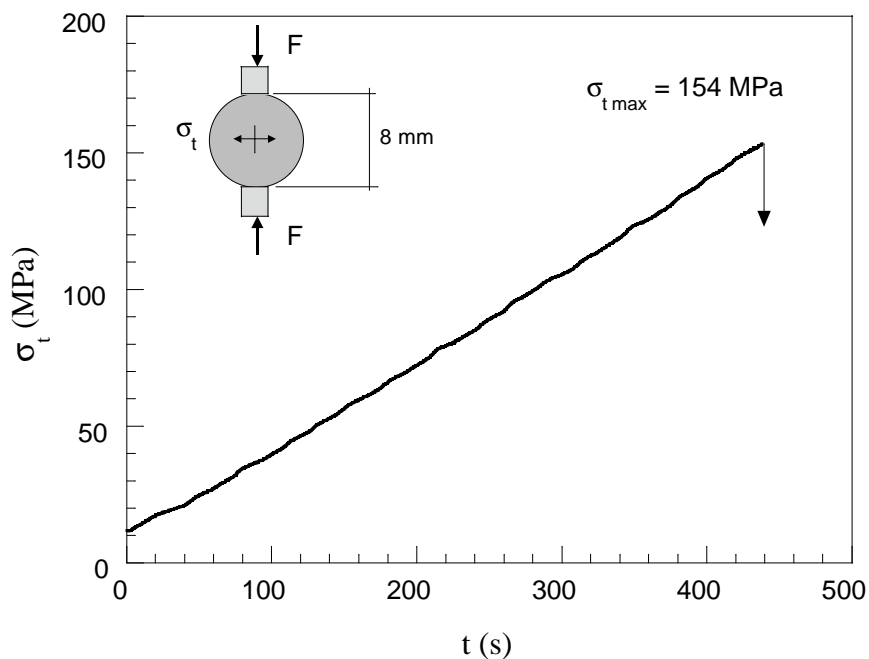
| Código de Ensayo: BLA9906 | |
|--|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.0 mm Longitud: 3.6 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.25 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 8020 N Resistencia a tracción: 177 MPa Velocidad de carga: 0.329 MPa/s Velocidad de deformación: 8.4·10⁻⁷ s⁻¹ | |

(*) Datos del fabricante.



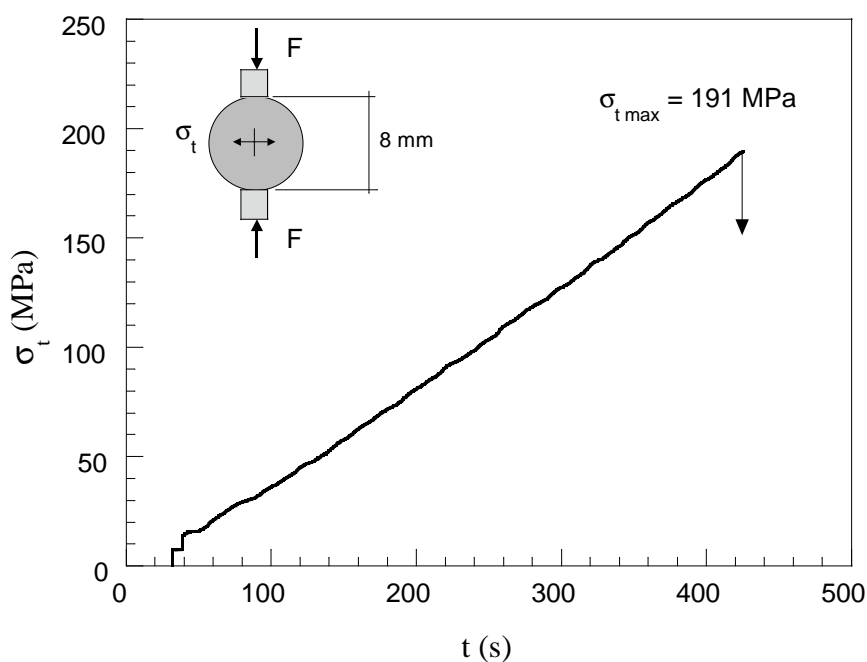
| Código de Ensayo: BLA9907 | |
|---|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas | Propiedades Geométricas |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m ³ | Diámetro: 8.0 mm |
| Resistencia a tracción (*): 262 MPa | Longitud: 3.6 mm |
| Módulo de rotura (*): 379 MPa | |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.25 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 6981 N Resistencia a tracción: 154 MPa Velocidad de carga: 0.328 MPa/s Velocidad de deformación: $8.4 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ | |

(*) Datos del fabricante.



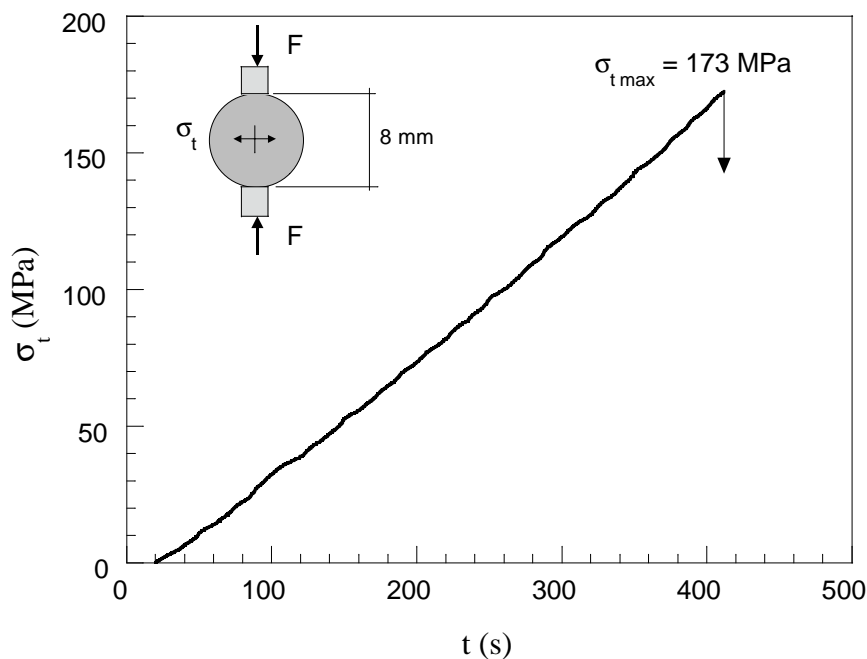
| Código de Ensayo: BLA9908 | |
|--|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.0 mm Longitud: 3.6 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.33 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 8631 N Resistencia a tracción: 191 MPa Velocidad de carga: 0.462 MPa/s Velocidad de deformación: 1.1·10⁻⁶ s⁻¹ | |

(*) Datos del fabricante.



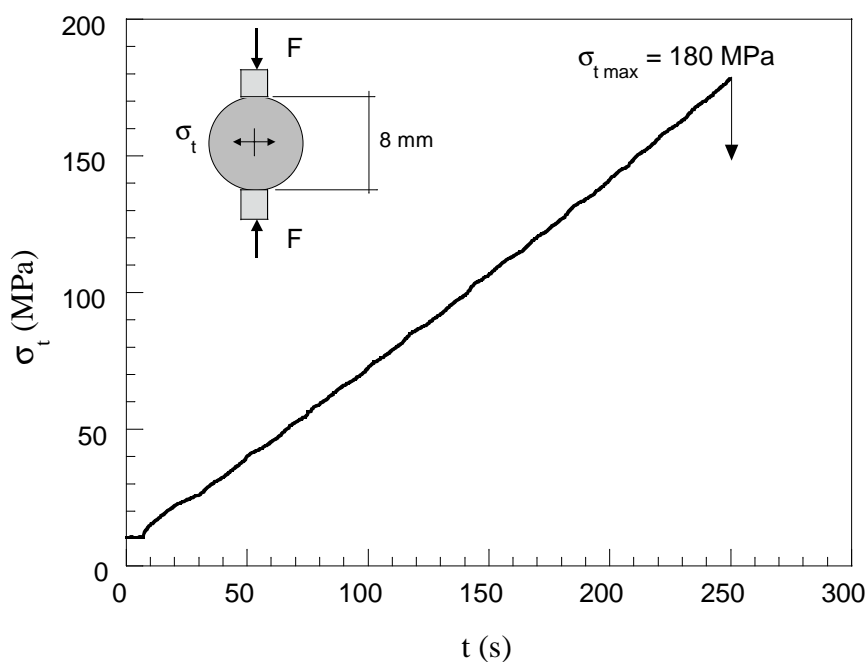
| | |
|--|--|
| Código de Ensayo: BLA9909 | |
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.0 mm Longitud: 3.6 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.33 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 7842 N Resistencia a tracción: 173 MPa Velocidad de carga: 0.437 MPa/s Velocidad de deformación: 1.1·10⁻⁶ s⁻¹ | |


(*) Datos del fabricante.



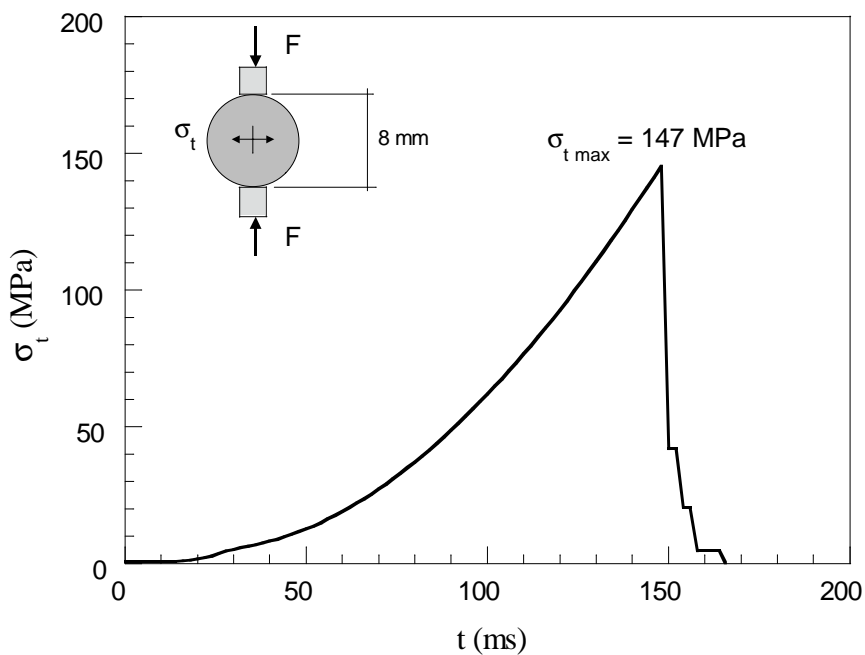
| Código de Ensayo: BLA9910 | |
|--|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.0 mm Longitud: 3.6 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.5 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 8145 N Resistencia a tracción: 180 MPa Velocidad de carga: 0.679 MPa/s Velocidad de deformación: 1.7·10⁻⁷ s⁻¹ | |


(*) Datos del fabricante.



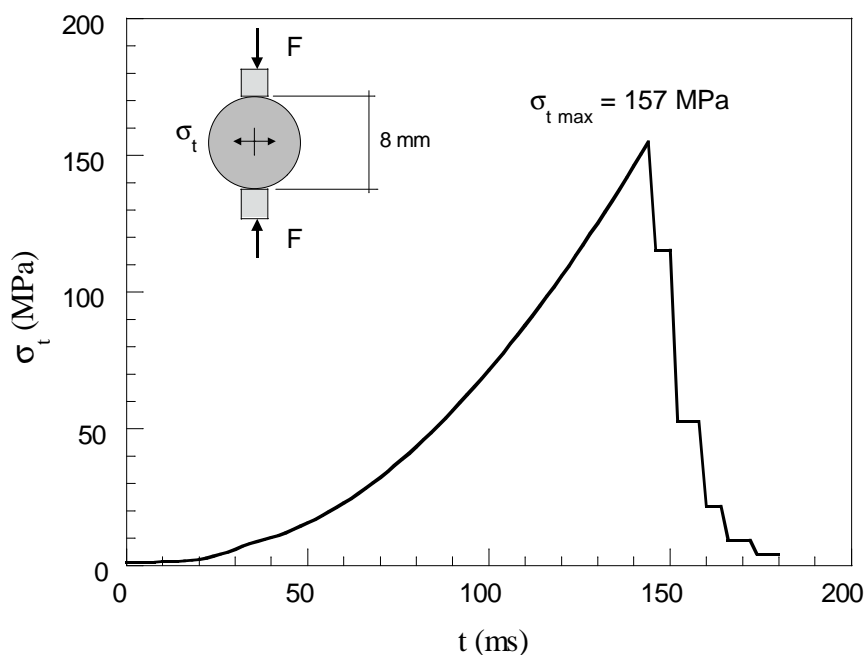
| Código de Ensayo: BMA9901 | |
|--|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.96 mm Longitud: 3.99 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 17 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 7350 N Resistencia a tracción: 147 MPa Velocidad de carga: 1860 MPa/s Velocidad de deformación: $4.8 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ |  |

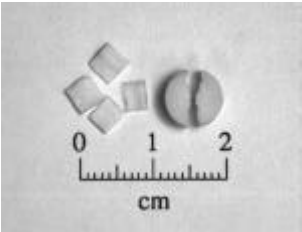
(*) Datos del fabricante.



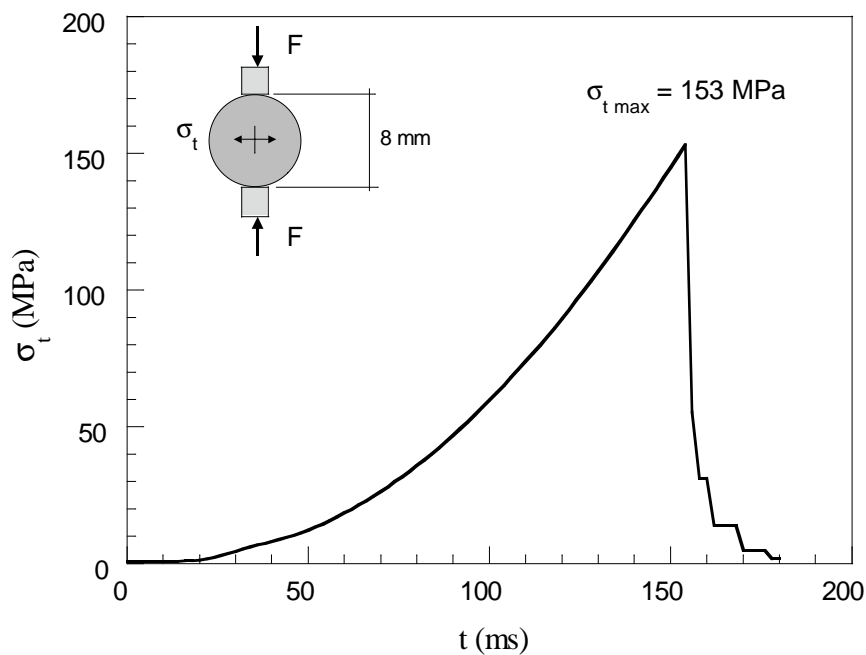
| Código de Ensayo: BMA9902 | |
|---|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.96 mm Longitud: 3.46 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 18 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 6798 N Resistencia a tracción: 157 MPa Velocidad de carga: 2030 MPa/s Velocidad de deformación: 5.2·10⁻³ s⁻¹ | |
|  | |

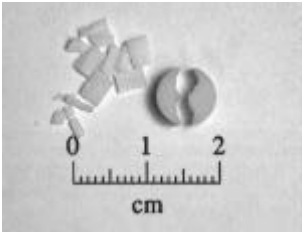
(*) Datos del fabricante.



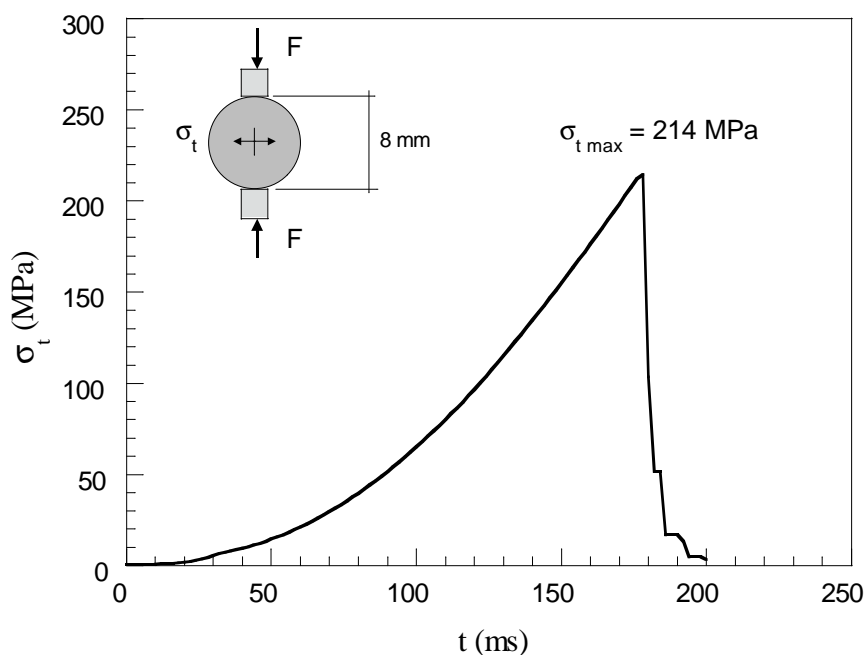
| Código de Ensayo: BMA9903 | |
|---|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas | Propiedades Geométricas |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m ³ | Diámetro: 7.96 mm |
| Resistencia a tracción (*): 262 MPa | Longitud: 3.96 mm |
| Módulo de rotura (*): 379 MPa | |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 18 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 7580 N Resistencia a tracción: 153 MPa Velocidad de carga: 1900 MPa/s Velocidad de deformación: 4.9·10⁻³ s⁻¹ |  |


(*) Datos del fabricante.



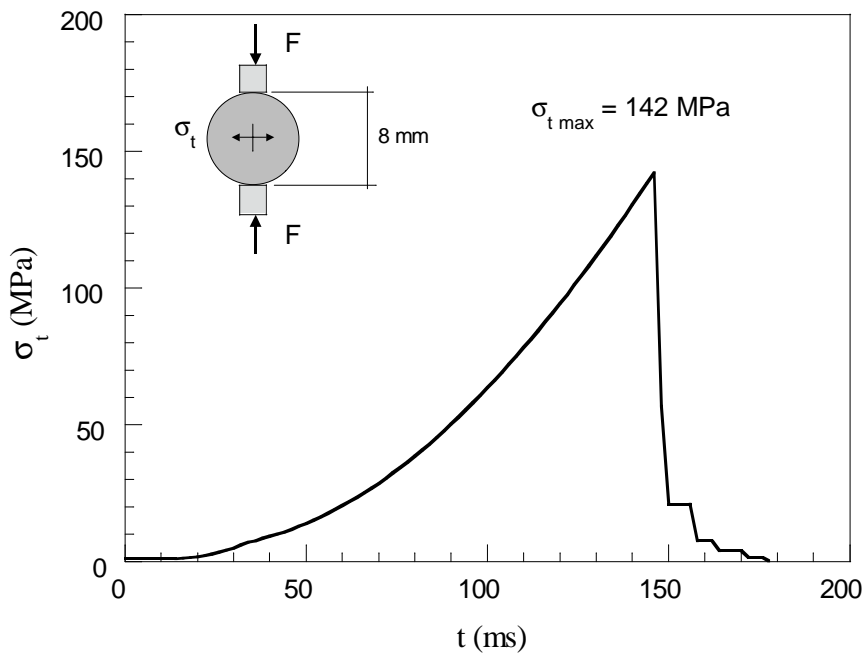
| Código de Ensayo: BMA9904 | |
|--|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.96 mm Longitud: 3.97 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 18 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 10649 N Resistencia a tracción: 215 MPa Velocidad de carga: 2180 MPa/s Velocidad de deformación: 5.6·10⁻³ s⁻¹ | |
|  | |

(*) Datos del fabricante.



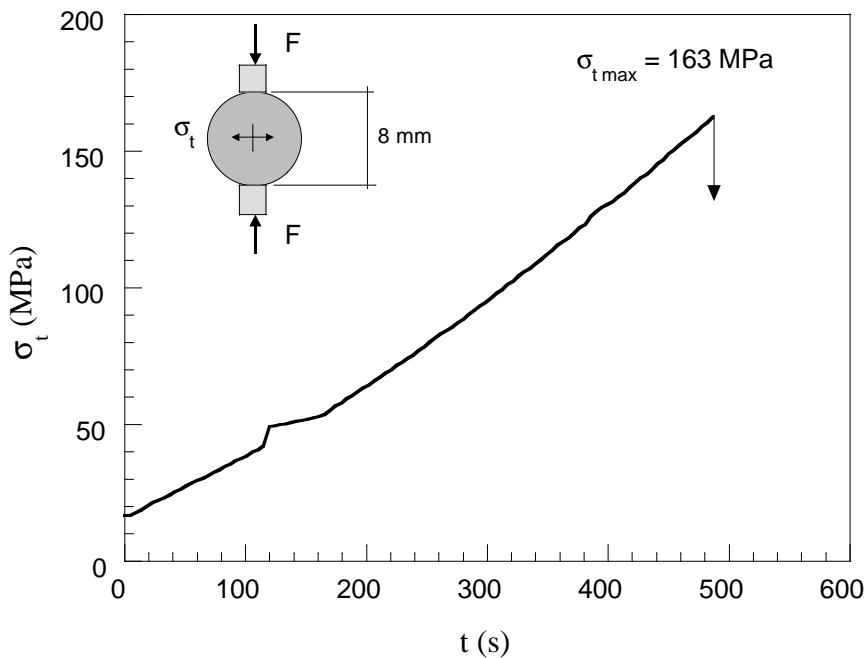
| Código de Ensayo: BMA9905 | |
|---|--|
| Material: AD99 (Alúmina de 99.5% de pureza) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 391 GPa Densidad: 3905 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 262 MPa Módulo de rotura (*): 379 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.96 mm Longitud: 3.97 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 18 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 7057 N Resistencia a tracción: 142 MPa Velocidad de carga: 1810 MPa/s Velocidad de deformación: 4.6·10⁻³ s⁻¹ |  |

(*) Datos del fabricante.

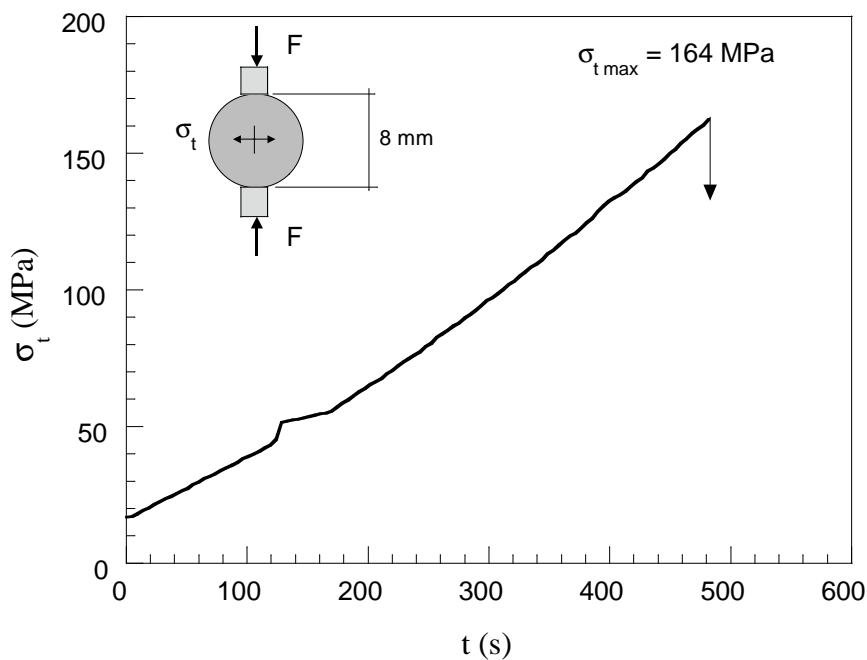


| | |
|--|---|
| Código de Ensayo: BLAZR00 | |
| Material: AZR (Alúmina reforzada con zircona) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 348 GPa Densidad: 4027 kg/m ³ Resistencia a tracción: Sin datos Módulo de rotura: Sin datos | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: desconocida. | Registro de datos: Únicamente se obtuvo el valor de la carga máxima y no el histórico de cargas por error de control de la máquina. |
| Resultados: Carga máxima: 19820 N Resistencia a tracción: 172 MPa Velocidad de carga: ≈ 1750 MPa/s Velocidad de deformación: ≈ 5·10⁻³ s⁻¹ | |

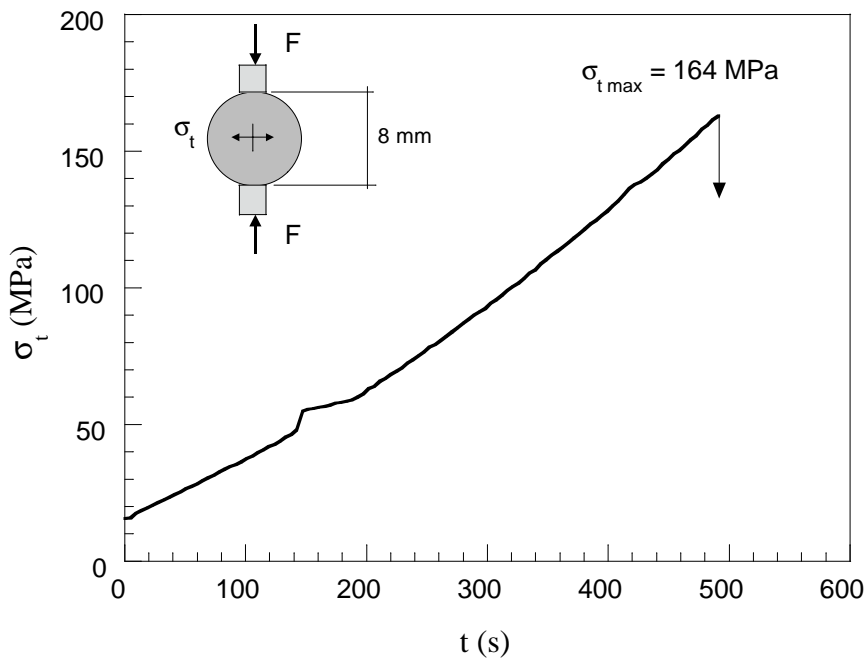
| Código de Ensayo: BLAZR01 | |
|--|--|
| Material: AZR (Alúmina reforzada con zircona) | |
| Propiedades Mecánicas | Propiedades Geométricas |
| Módulo de elasticidad: 348 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 4027 kg/m ³ | Diámetro: 12.0 mm |
| Resistencia a tracción: Sin datos | Longitud: 6.1 mm |
| Módulo de rotura: Sin datos | |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.03 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 18730 N Resistencia a tracción: 163 MPa Velocidad de carga: 0.342 MPa/s Velocidad de deformación: $9.8 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ | |



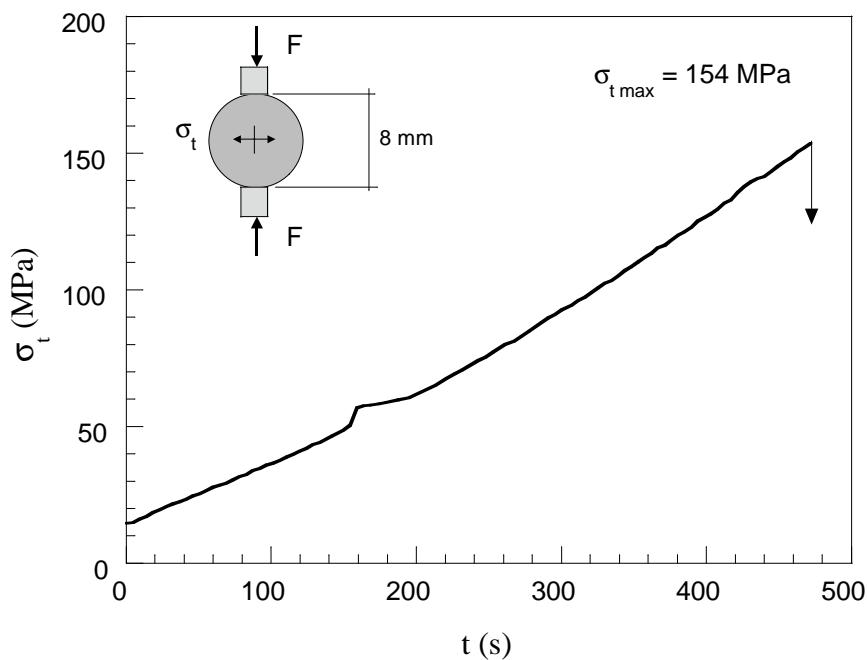
| Código de Ensayo: BLAZR02 | |
|---|--|
| Material: AZR (Alúmina reforzada con zircona) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 348 GPa Densidad: 4027 kg/m ³ Resistencia a tracción: Sin datos Módulo de rotura: Sin datos | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.03 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 18850 N Resistencia a tracción: 164 MPa Velocidad de carga: 0.351 MPa/s Velocidad de deformación: 1.0·10⁻⁶ s⁻¹ | |



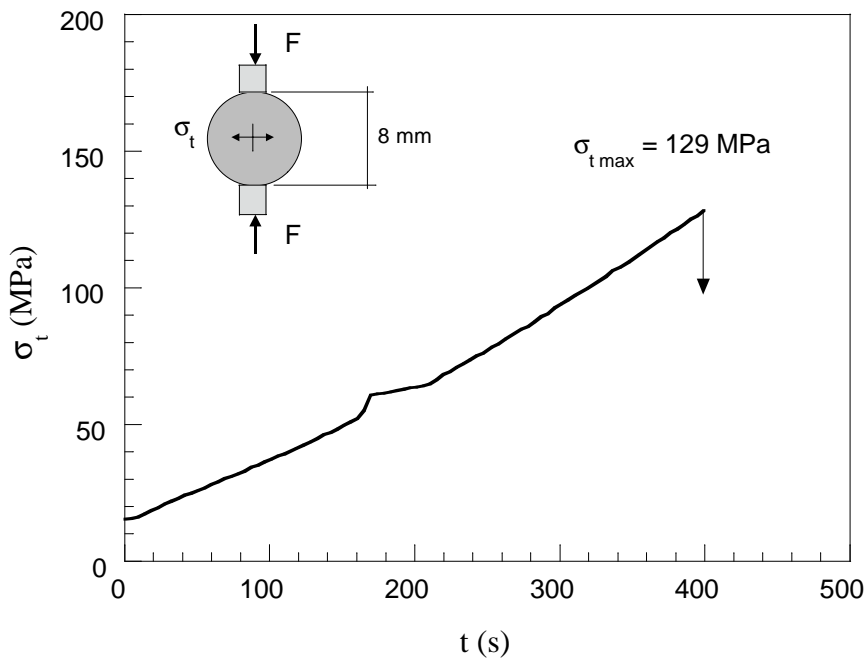
| Código de Ensayo: BLAZR03 | |
|--|--|
| Material: AZR (Alúmina reforzada con zircona) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 348 GPa Densidad: 4027 kg/m ³ Resistencia a tracción: Sin datos Módulo de rotura: Sin datos | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.03 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 18810 N Resistencia a tracción: 164 MPa Velocidad de carga: 0.355 MPa/s Velocidad de deformación: $1.0 \cdot 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ | |



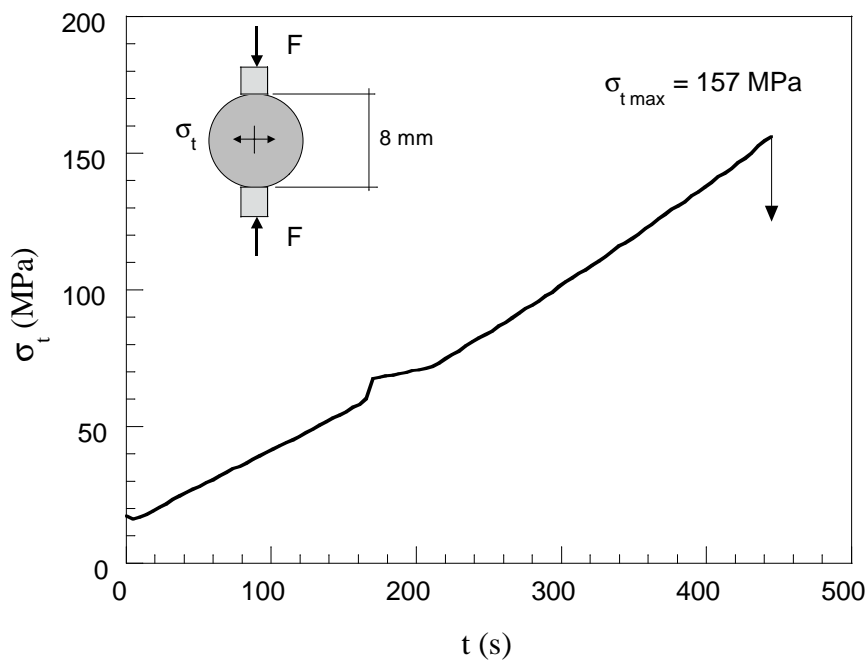
| Código de Ensayo: BLAZR04 | |
|---|--|
| Material: AZR (Alúmina reforzada con zircona) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 348 GPa Densidad: 4027 kg/m ³ Resistencia a tracción: Sin datos Módulo de rotura: Sin datos | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.03 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 17690 N Resistencia a tracción: 154 MPa Velocidad de carga: 0.347 MPa/s Velocidad de deformación: 1.0·10⁻⁶ s⁻¹ | |



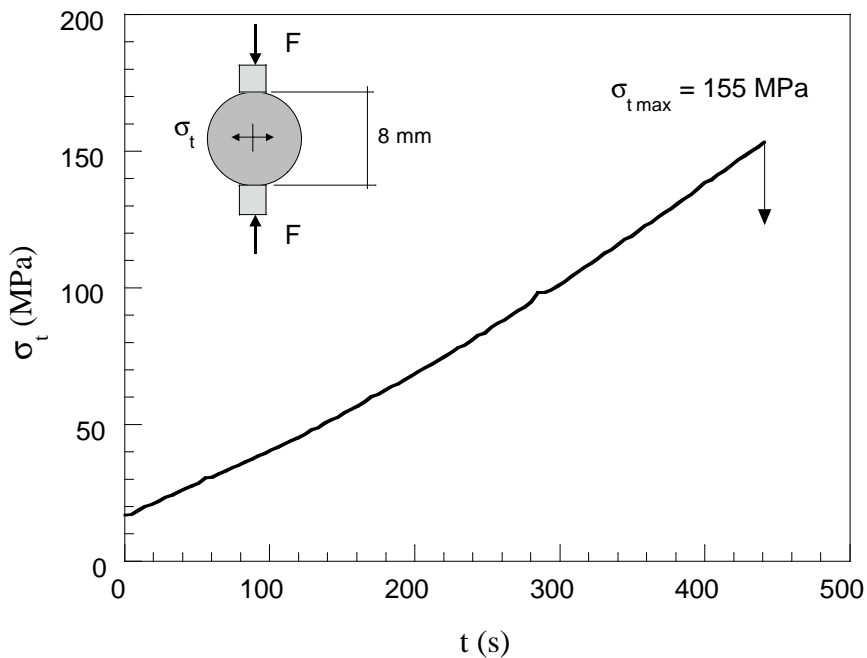
| Código de Ensayo: BLAZR05 | |
|--|--|
| Material: AZR (Alúmina reforzada con zircona) | |
| Propiedades Mecánicas | Propiedades Geométricas |
| Módulo de elasticidad: 348 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 4027 kg/m ³ | Diámetro: 12.0 mm |
| Resistencia a tracción: Sin datos | Longitud: 6.1 mm |
| Módulo de rotura: Sin datos | |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.03 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 14810 N Resistencia a tracción: 129 MPa Velocidad de carga: 0.341 MPa/s Velocidad de deformación: $9.8 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ | |




| Código de Ensayo: BLAZR06 | |
|---|--|
| Material: AZR (Alúmina reforzada con zircona) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 348 GPa Densidad: 4027 kg/m ³ Resistencia a tracción: Sin datos Módulo de rotura: Sin datos | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.03 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 18030 N Resistencia a tracción: 157 MPa Velocidad de carga: 0.356 MPa/s Velocidad de deformación: 1.0·10⁻⁶ s⁻¹ | |

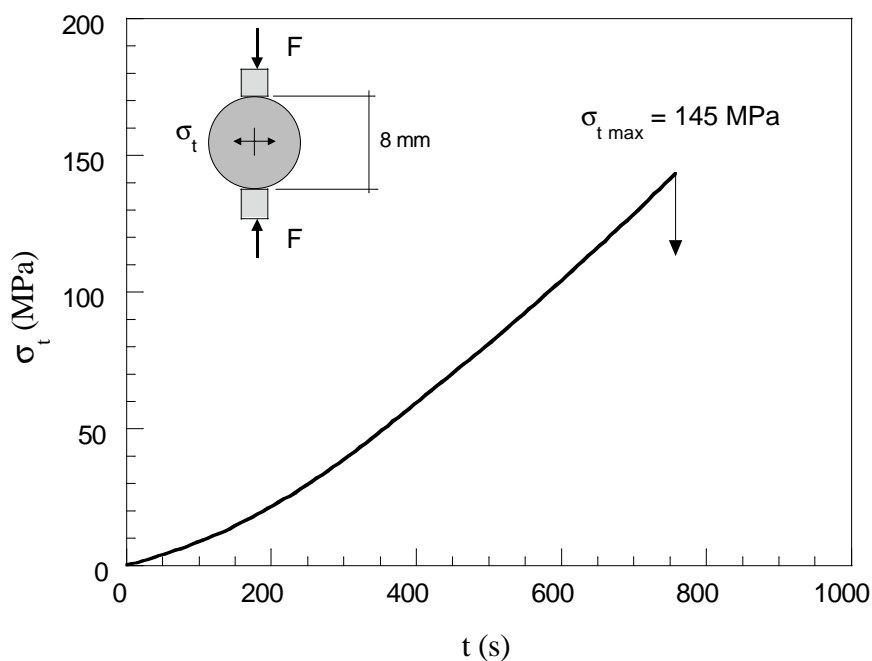



| Código de Ensayo: BLAZR07 | |
|--|--|
| Material: AZR (Alúmina reforzada con zircona) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 348 GPa Densidad: 4027 kg/m ³ Resistencia a tracción: Sin datos Módulo de rotura: Sin datos | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 12.0 mm Longitud: 6.1 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 1270 | |
| Fecha del Ensayo: 8 de Marzo de 1999. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Temperatura: 20°C |
| Control de máquina: Desplazamiento de actuador. Velocidad: 0.03 mm/min. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 17870 N Resistencia a tracción: 155 MPa Velocidad de carga: 0.329 MPa/s Velocidad de deformación: $9.5 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ | |



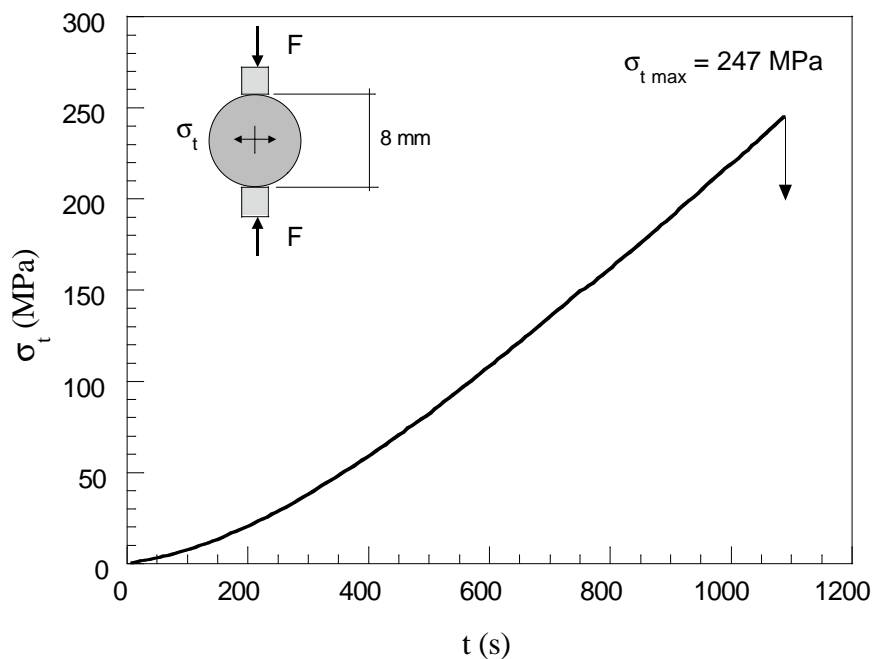
| Código de Ensayo: BLSIC01 | |
|--|--|
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 420 GPa Densidad: 3133 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 307 MPa Módulo de rotura (*): 462 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.99 mm Longitud: 3.99 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 17 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 7259 N Resistencia a tracción: 145 MPa Velocidad de carga: 0.247 MPa/s Velocidad de deformación: 5.9·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |

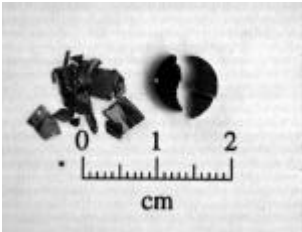
(*) Datos del fabricante.



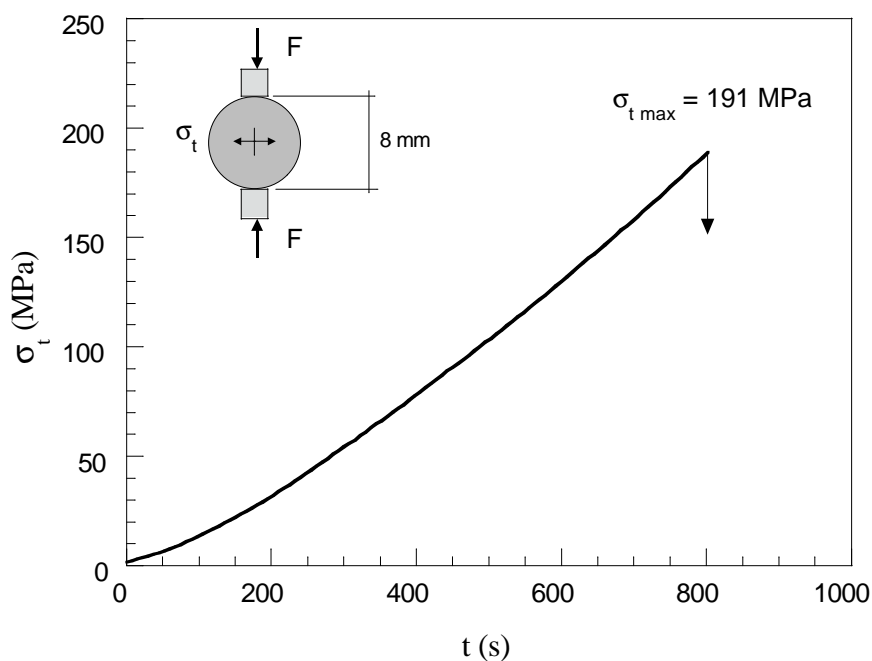
| Código de Ensayo: BLSIC02 | |
|---|--|
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas | Propiedades Geométricas |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m ³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción (*): 307 MPa | Longitud: 4.00 mm |
| Módulo de rotura (*): 462 MPa | |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 22 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 12370 N Resistencia a tracción: 247 MPa Velocidad de carga: 0.290 MPa/s Velocidad de deformación: 6.9·10⁻⁷ s⁻¹ |  |

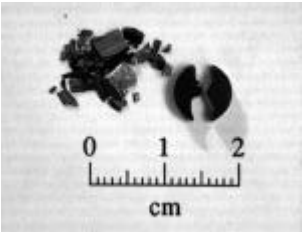
(*) Datos del fabricante.



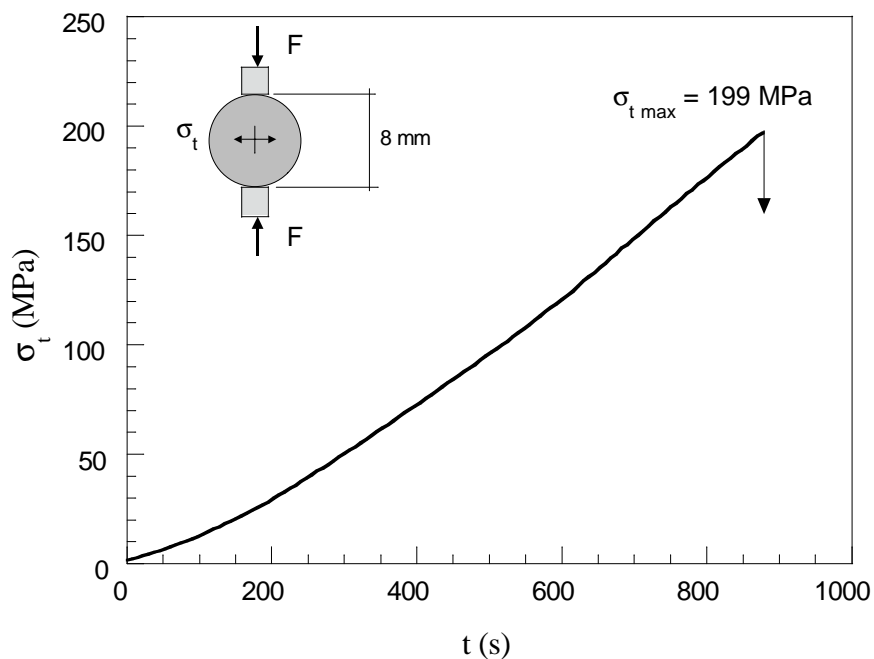
| Código de Ensayo: BLSIC03 | |
|--|--|
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 420 GPa Densidad: 3133 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 307 MPa Módulo de rotura (*): 462 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.97 mm Longitud: 3.99 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 22 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 9534 N Resistencia a tracción: 191 MPa Velocidad de carga: 0.287 MPa/s Velocidad de deformación: 6.8·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |


(*) Datos del fabricante.



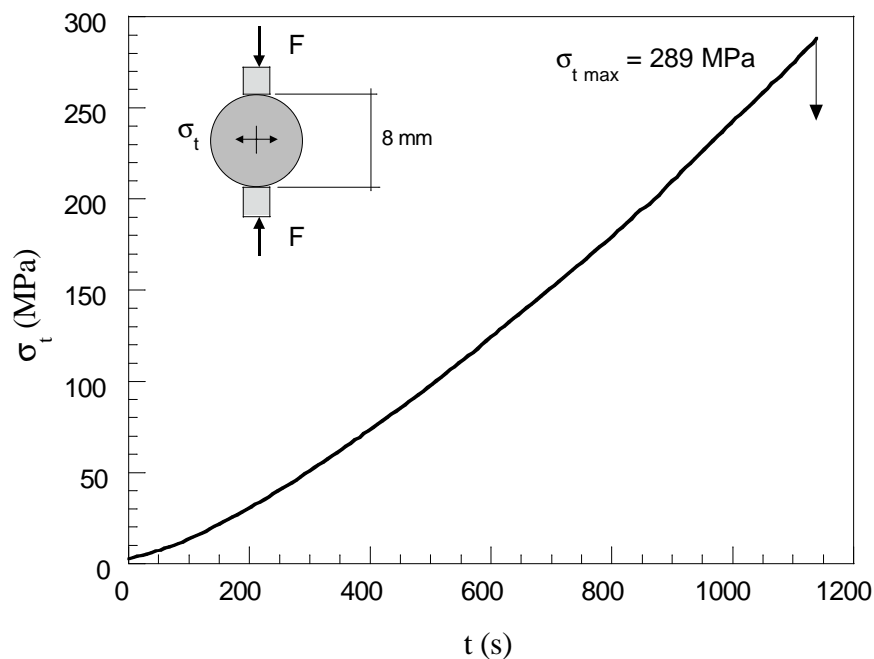
| Código de Ensayo: BLSIC04 | |
|---|--|
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 420 GPa Densidad: 3133 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 307 MPa Módulo de rotura (*): 462 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.97 mm Longitud: 3.97 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 22 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 9873 N Resistencia a tracción: 199 MPa Velocidad de carga: 0.288 MPa/s Velocidad de deformación: $6.9 \cdot 10^{-7} \text{ s}^{-1}$ |  |

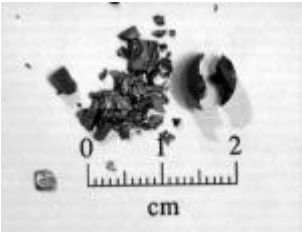
(*) Datos del fabricante.



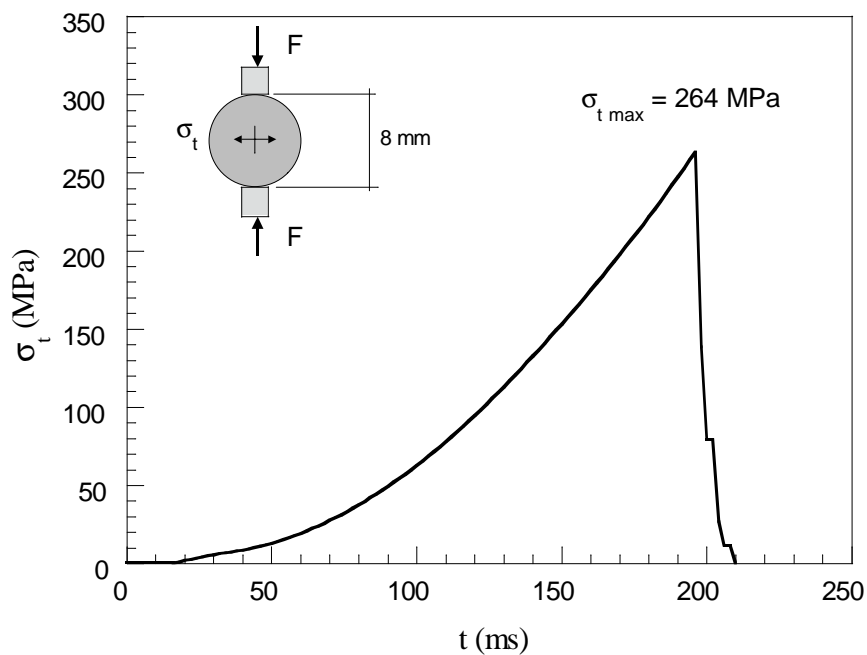
| Código de Ensayo: BLSIC05 | |
|---|--|
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 420 GPa Densidad: 3133 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 307 MPa Módulo de rotura (*): 462 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.98 mm Longitud: 3.97 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 22 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 14389 N Resistencia a tracción: 289 MPa Velocidad de carga: 0.313 MPa/s Velocidad de deformación: 7.5·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |


(*) Datos del fabricante.



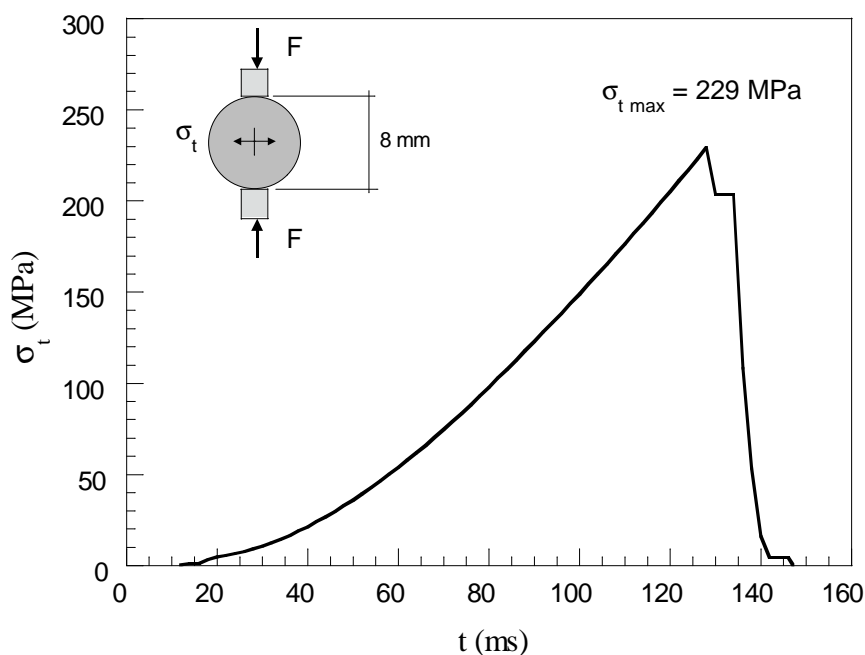
| Código de Ensayo: BMSIC01 | |
|--|--|
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 420 GPa Densidad: 3133 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 307 MPa Módulo de rotura (*): 462 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.97 mm Longitud: 4.00 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 17 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 13200 N Resistencia a tracción: 264 MPa Velocidad de carga: 2380 MPa/s Velocidad de deformación: 5.7·10⁻³ s⁻¹ |  |

(*) Datos del fabricante.

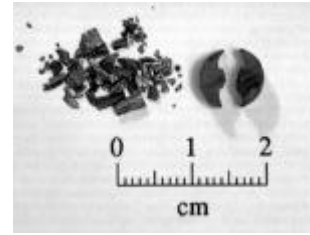


| Código de Ensayo: BMSIC02 | |
|--|--|
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 420 GPa Densidad: 3133 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 307 MPa Módulo de rotura (*): 462 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.97 mm Longitud: 3.96 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 22 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 11374 N Resistencia a tracción: 229 MPa Velocidad de carga: 2810 MPa/s Velocidad de deformación: 6.7·10⁻³ s⁻¹ | |
|  | |

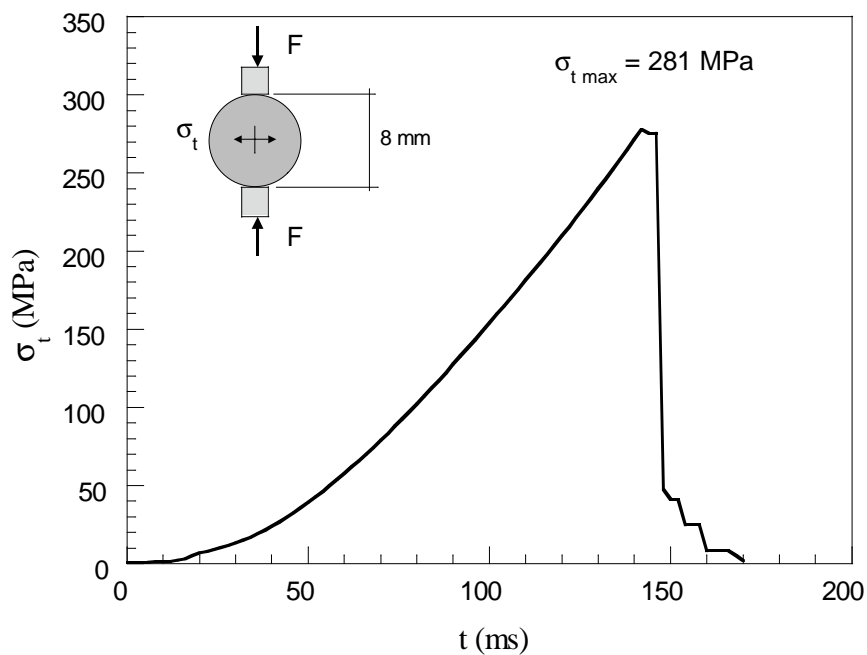
(*) Datos del fabricante.

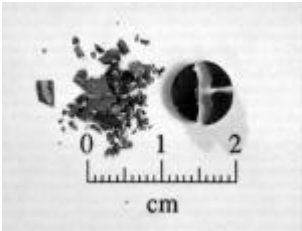


| | |
|---|--|
| Código de Ensayo: BMSIC03 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 420 GPa Densidad: 3133 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 307 MPa Módulo de rotura (*): 462 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.97 mm Longitud: 4.00 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 22 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 14088 N Resistencia a tracción: 281 MPa Velocidad de carga: 3021 MPa/s Velocidad de deformación: $7.2 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ | |

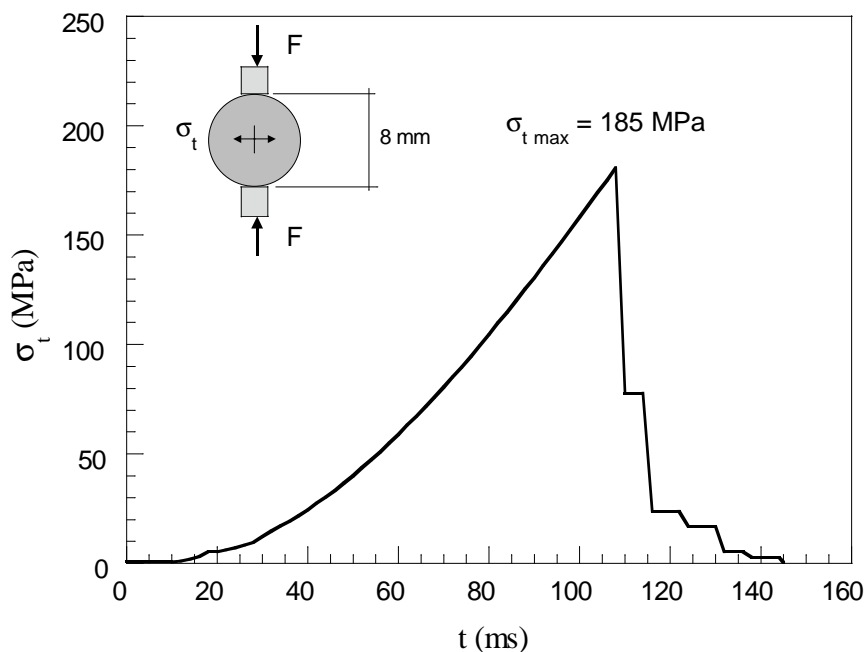


(*) Datos del fabricante.

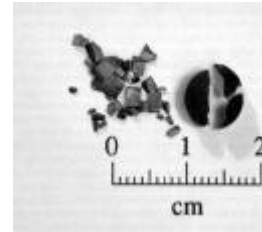


| Código de Ensayo: BMSIC04 | |
|---|--|
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 420 GPa Densidad: 3133 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 307 MPa Módulo de rotura (*): 462 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.98 mm Longitud: 3.98 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 22 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Defecto superficial producido en el pulido. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 9170 N Resistencia a tracción: 185 MPa Velocidad de carga: 2742 MPa/s Velocidad de deformación: 6.5·10⁻³ s⁻¹ | |
|  | |

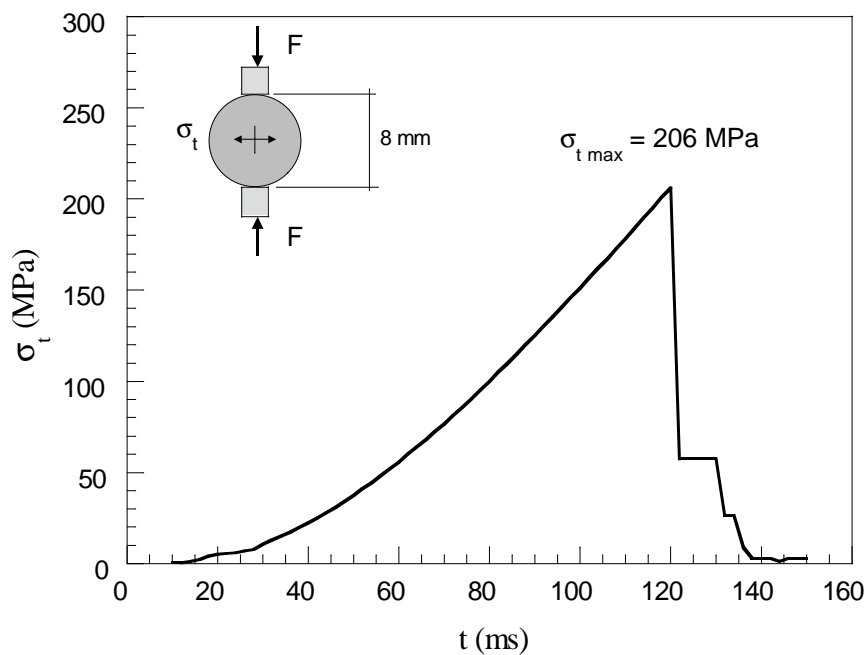
(*) Datos del fabricante.




| | |
|---|--|
| Código de Ensayo: BMSIC05 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 420 GPa Densidad: 3133 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): 307 MPa Módulo de rotura (*): 462 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.99 mm Longitud: 3.99 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 22 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 10317 N Resistencia a tracción: 206 MPa Velocidad de carga: 2710 MPa/s Velocidad de deformación: $6.5 \cdot 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ | |

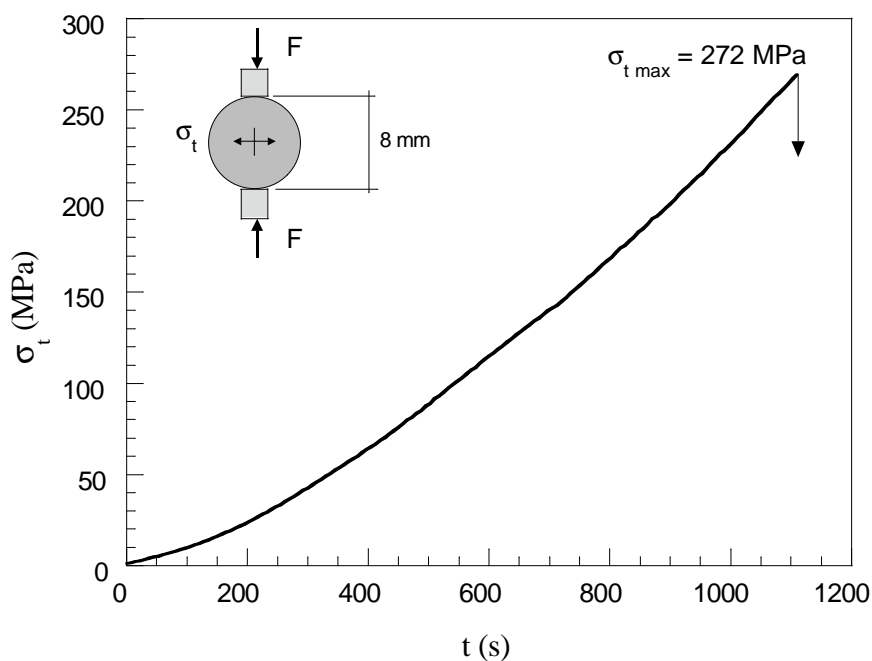


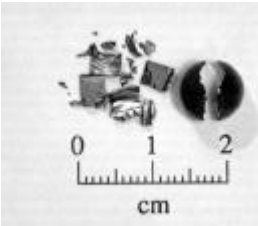
(*) Datos del fabricante.



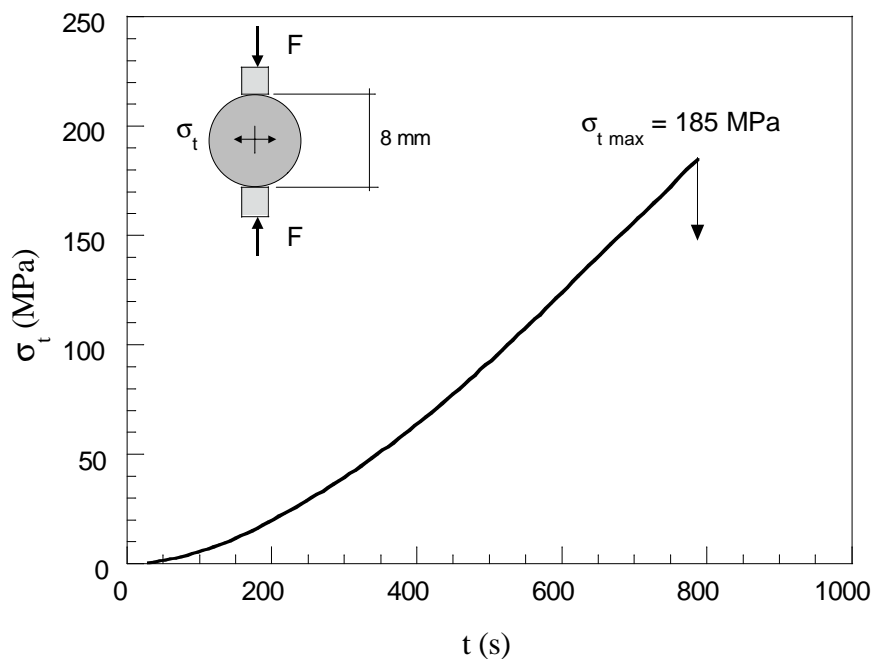
| Código de Ensayo: BLB4C01 | |
|---|--|
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.00 mm Longitud: 4.00 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 17 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 13665 N Resistencia a tracción: 272 MPa Velocidad de carga: 0.319 MPa/s Velocidad de deformación: 6.9·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |


(*) Datos del fabricante.



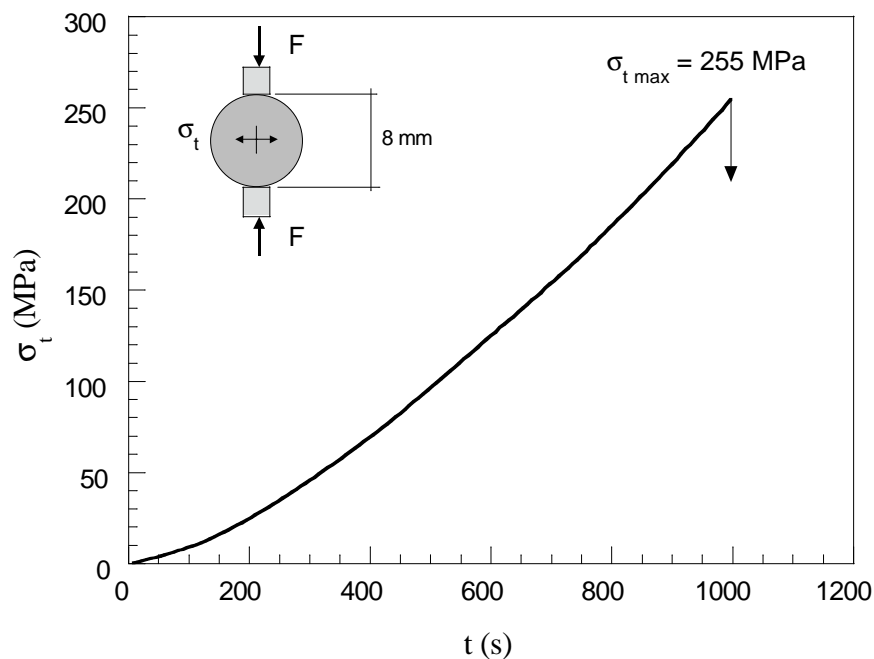
| | |
|--|--|
| Código de Ensayo: BLB4C02 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.00 mm Longitud: 3.90 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 23 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 9063 N Resistencia a tracción: 185 MPa Velocidad de carga: 0.324 MPa/s Velocidad de deformación: 7.0·10⁻⁷ s⁻¹ |  |

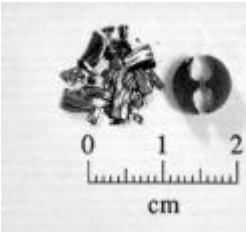
(*) Datos del fabricante.



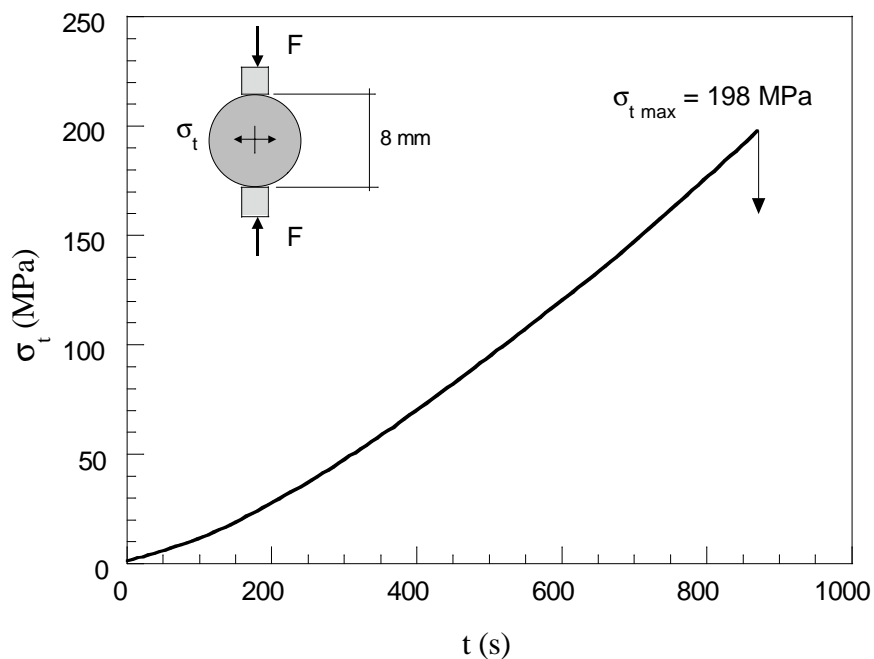
| | |
|---|--|
| Código de Ensayo: BLB4C03 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.99 mm Longitud: 3.97 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 23 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 12710 N Resistencia a tracción: 255 MPa Velocidad de carga: 0.325 MPa/s Velocidad de deformación: 7.1·10⁻⁷ s⁻¹ | |
|  | |

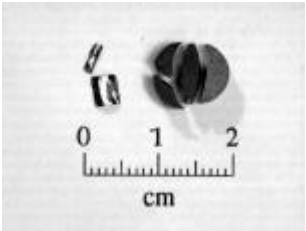
(*) Datos del fabricante.



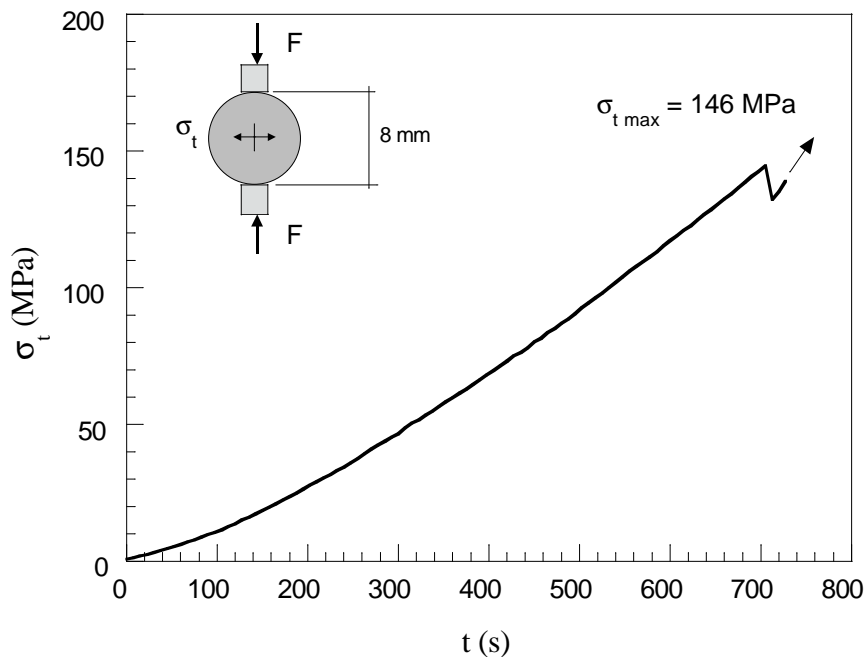
| | |
|--|--|
| Código de Ensayo: BLB4C04 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.00 mm Longitud: 3.92 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 23 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 9749 N Resistencia a tracción: 198 MPa Velocidad de carga: 0.287 MPa/s Velocidad de deformación: 6.2·10⁻⁷ s⁻¹ |  |


(*) Datos del fabricante.



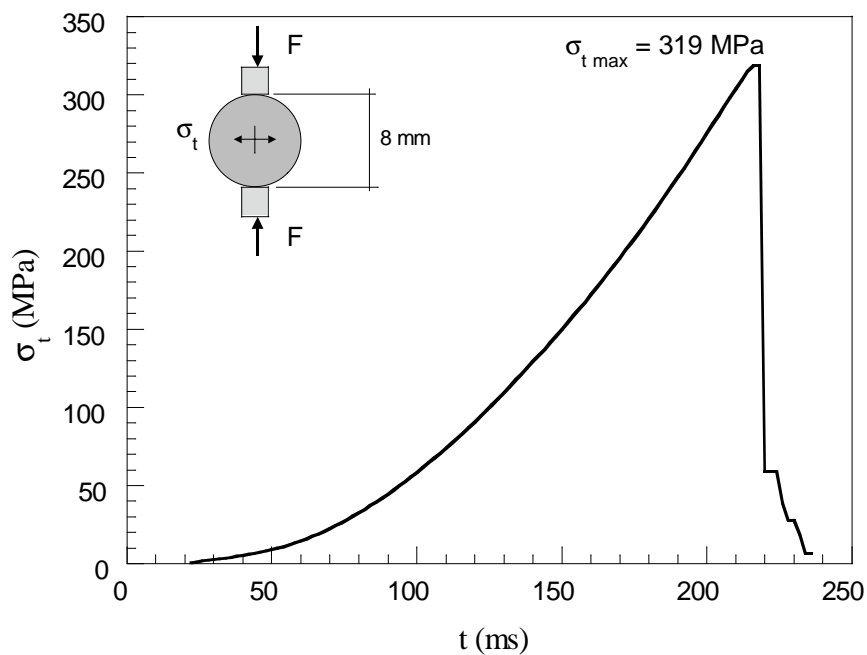
| Código de Ensayo: BLB4C05 | |
|--|--|
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 8.00 mm Longitud: 3.99 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 23 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Rotura generando una columna central. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 0.2 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 146 N Resistencia a tracción: 7304 MPa Velocidad de carga: 0.256 MPa/s Velocidad de deformación: 5.6·10⁻⁷ s⁻¹ |  |

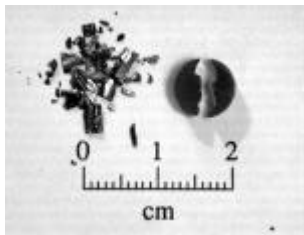
(*) Datos del fabricante.



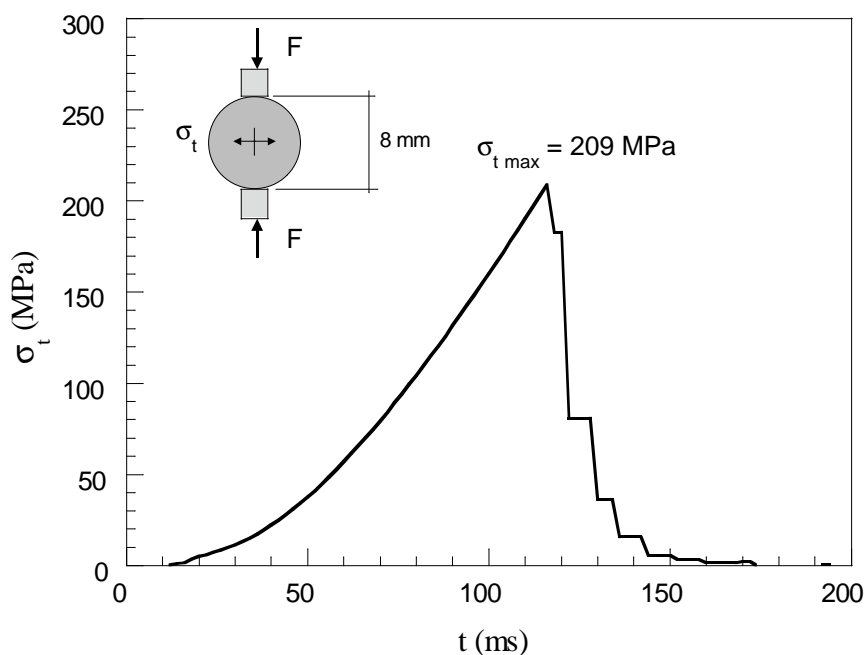
| Código de Ensayo: BMB4C01 | |
|--|--|
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.98 mm Longitud: 4.00 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 17 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 15974 N Resistencia a tracción: 319 MPa Velocidad de carga: 2735 MPa/s Velocidad de deformación: 5.9·10⁻³ s⁻¹ |  |

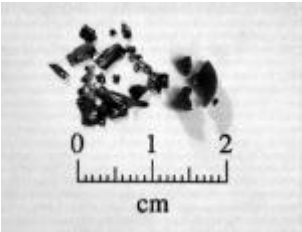
(*) Datos del fabricante.



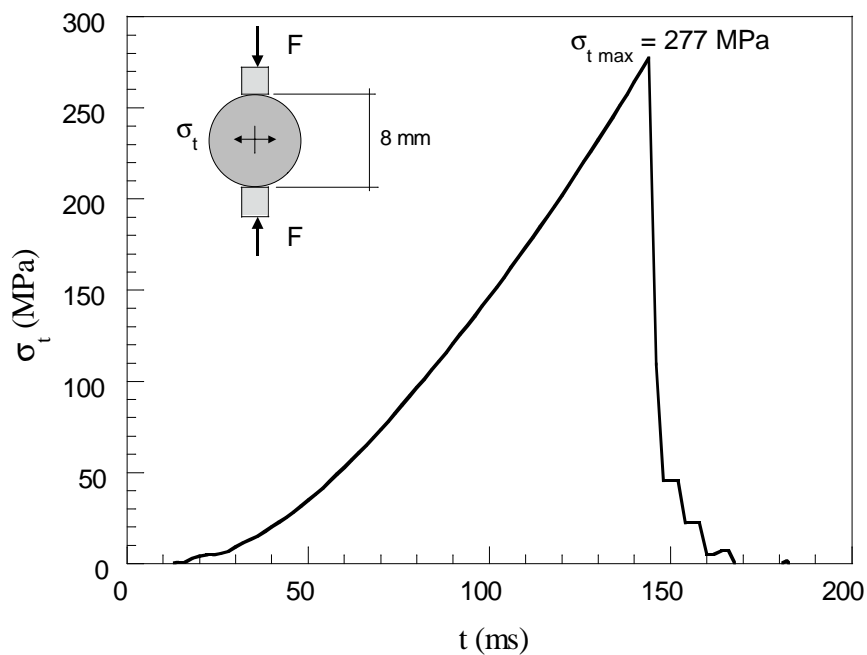
| Código de Ensayo: BMB4C02 | |
|--|--|
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.98 mm Longitud: 3.91 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 23 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 10235 N Resistencia a tracción: 209 MPa Velocidad de carga: 2960 MPa/s Velocidad de deformación: 6.4·10⁻³ s⁻¹ |  |


(*) Datos del fabricante.



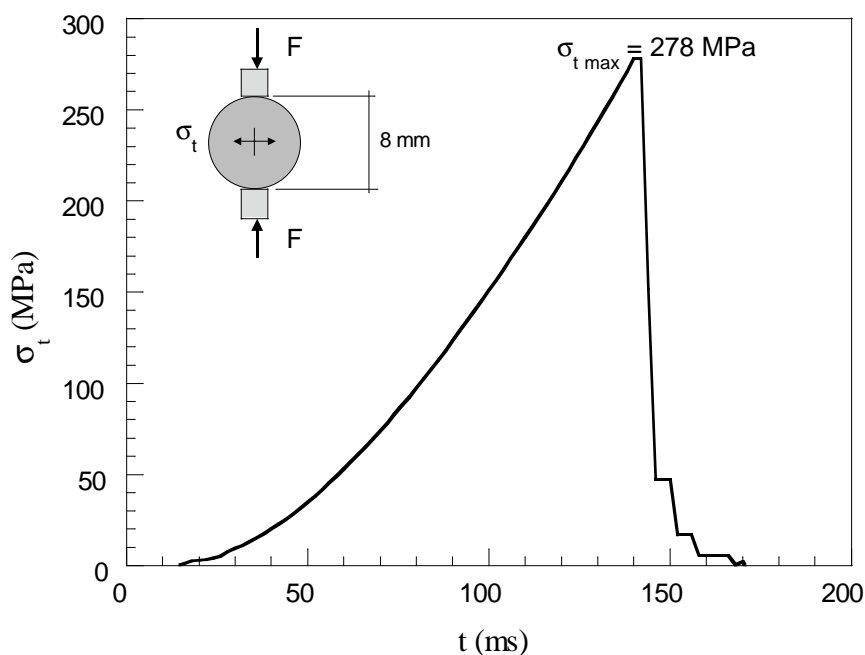
| Código de Ensayo: BMB4C03 | |
|--|--|
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.98 mm Longitud: 3.89 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 23 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 13526 N Resistencia a tracción: 277 MPa Velocidad de carga: 2980 MPa/s Velocidad de deformación: 6.5·10⁻³ s⁻¹ |  |


(*) Datos del fabricante.



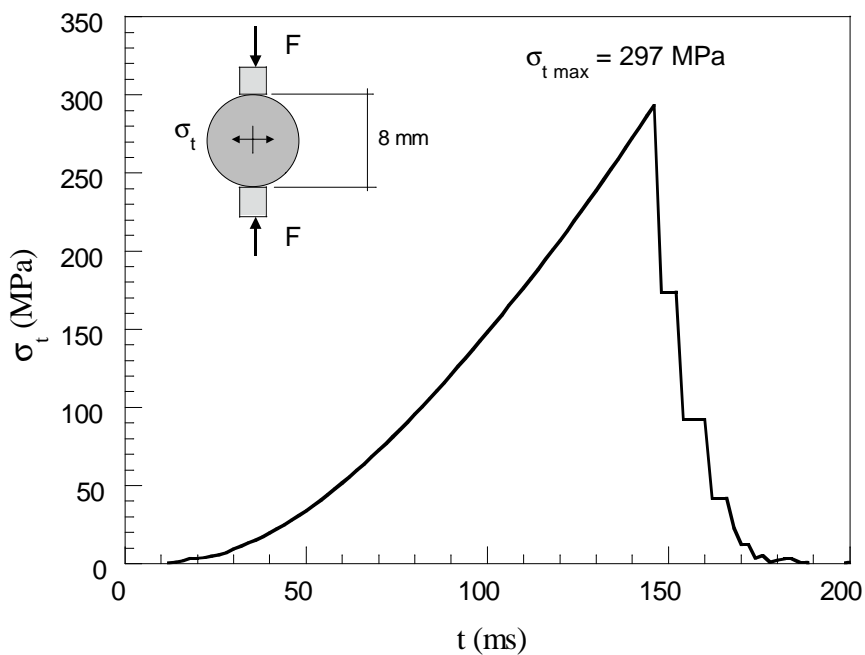
| Código de Ensayo: BMB4C04 | |
|--|--|
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.99 mm Longitud: 3.96 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 23 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 13825 N Resistencia a tracción: 278 MPa Velocidad de carga: 3270 MPa/s Velocidad de deformación: 7.1·10⁻³ s⁻¹ | |
|  | |

(*) Datos del fabricante.



| Código de Ensayo: BMB4C05 | |
|--|--|
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| Propiedades Mecánicas Módulo de elasticidad: 461 GPa Densidad: 2512 kg/m ³ Resistencia a tracción (*): Sin datos Módulo de rotura (*): 350 MPa | Propiedades Geométricas Probeta cilíndrica. Diámetro: 7.97 mm Longitud: 3.86 mm |
| Máquina de Ensayo: Servohidráulica Instron 8501 | |
| Fecha del Ensayo: 23 de Julio de 1996. | Observaciones: Apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. |
| Control de máquina: Desplazamiento de platos mediante LVDT. Velocidad: 2000 µm/s. | Registro de datos: Canal 1: Célula de carga Instron 25 kN Canal 2: Desplazamiento platos LVDT. Canal 3: Desplazamiento del actuador. |
| Resultados: Carga máxima: 14330 N Resistencia a tracción: 297 MPa Velocidad de carga: 3265 MPa/s Velocidad de deformación: 7.1·10⁻³ s⁻¹ | |
|  | |

(*) Datos del fabricante.



Apéndice B.

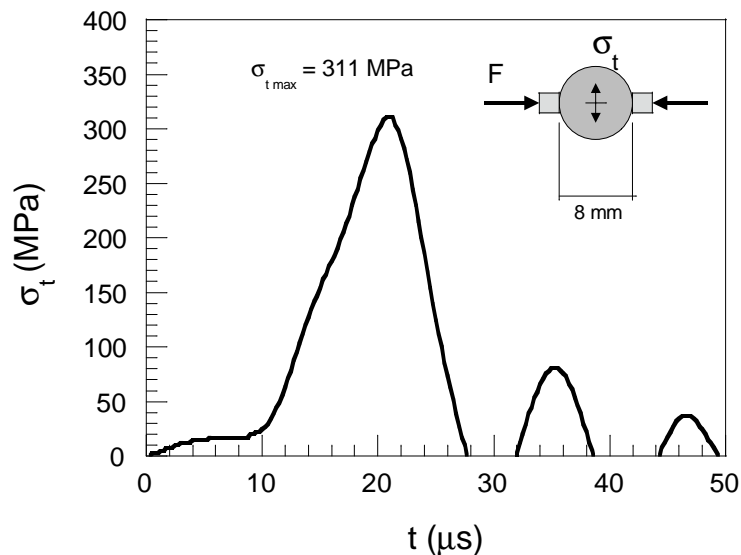
ENSAYOS DINÁMICOS DE

TRACCIÓN INDIRECTA POR

COMPRESIÓN DIAMETRAL

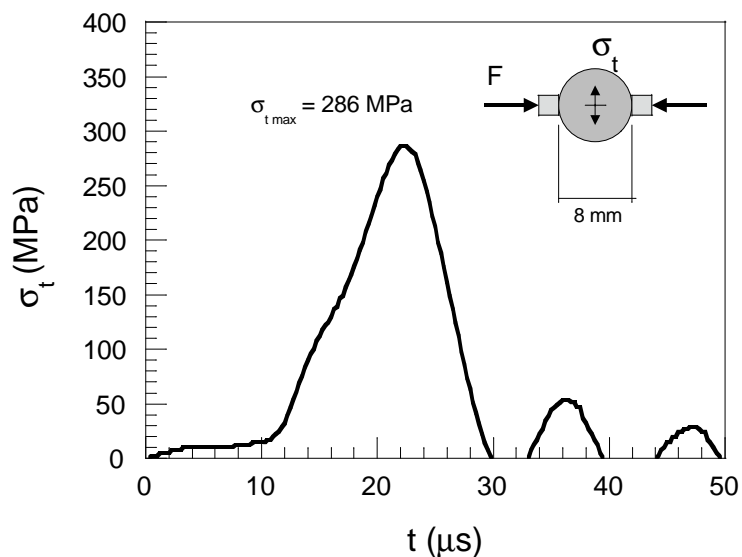
| Código de Ensayo: BRA9401 | |
|---|--------------------------------|
| Material: Alúmina de 94% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m ³ | Diámetro: 8.01 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 193 MPa | Longitud: 4.08 mm |
| Módulo de rotura ¹ 352 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Noviembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| No se obtuvieron fotografías. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: 16.0 kN. | |
| Resistencia a tracción: 311 MPa. | |
| Velocidad de carga: 27.9·10⁶ MPa/s | |

- ¹ Datos del fabricante



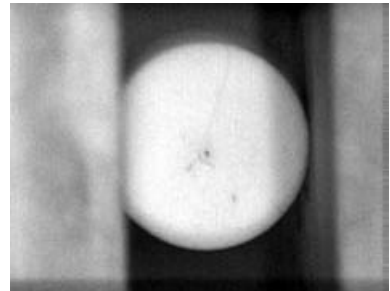
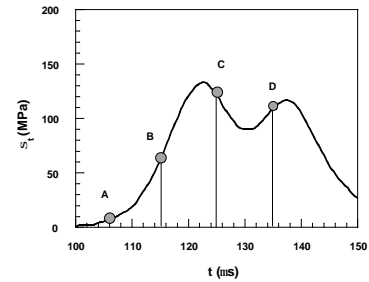
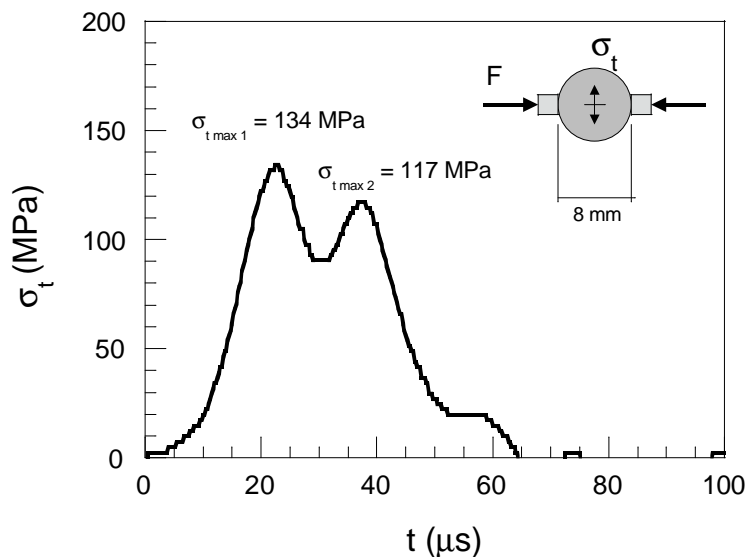
| Código de Ensayo: BRA9402 | |
|---|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 94% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m³ | Diámetro: 8.02 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 193 MPa | Longitud: 4.08 mm |
| Módulo de rotura ¹ 352 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Noviembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| No se obtuvieron fotografías. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 14.7 kN. |
| Resistencia a tracción: | 286 MPa. |
| Velocidad de carga: | 26.8·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

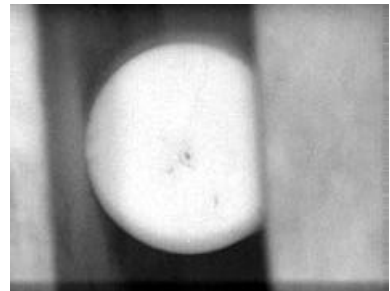


| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRA9404 | |
| Material: Alúmina de 94% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m³ | Diámetro: 8.01 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 193 MPa | Longitud: 4.09 mm |
| Módulo de rotura ¹ 352 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Noviembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=500mm del extremo de impacto con el proyectil y del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9404A.TIF: exposición 2μs, retraso de 105 μs . | |
| BRA9404B.TIF: exposición 2μs, retraso de 115 μs . | |
| BRA9404C.TIF: exposición 2μs, retraso de 125 μs . | |
| BRA9404D.TIF: exposición 2μs, retraso de 135 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 6.9 kN. |
| Resistencia a tracción: | 134 MPa. |
| Velocidad de carga: | 11.6·10⁶ MPa/s |

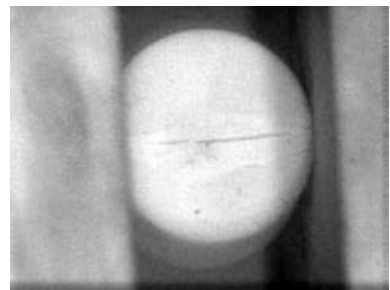
¹ Datos del fabricante



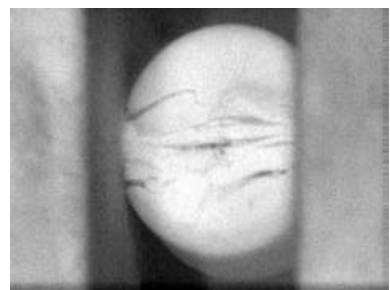
BRA9404A



BRA9404B



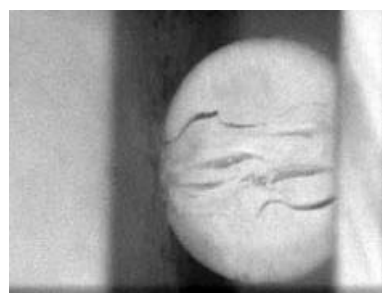
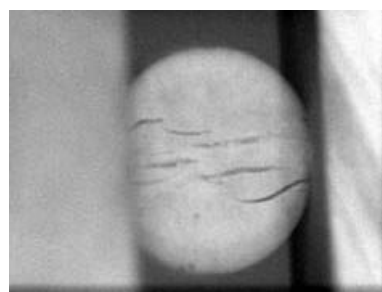
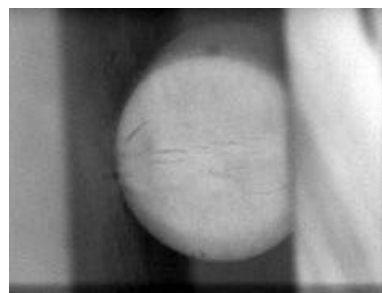
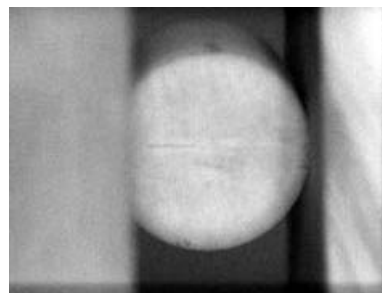
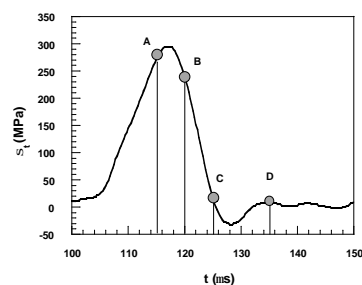
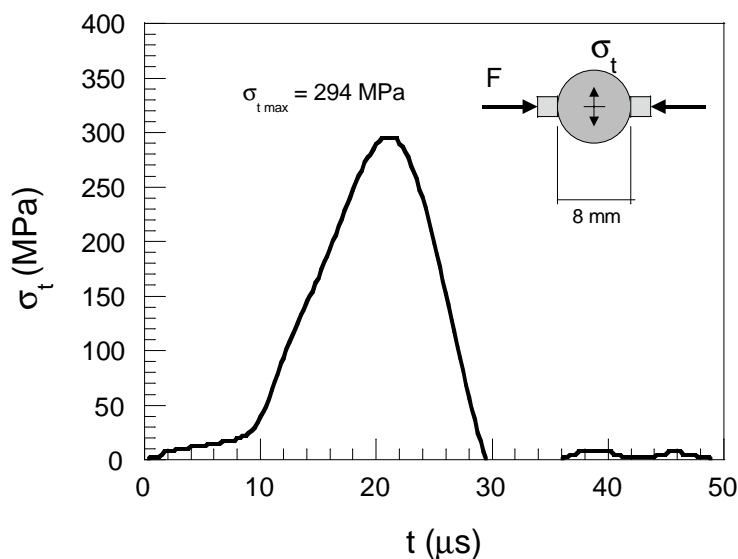
BRA9404C



BRA9404D

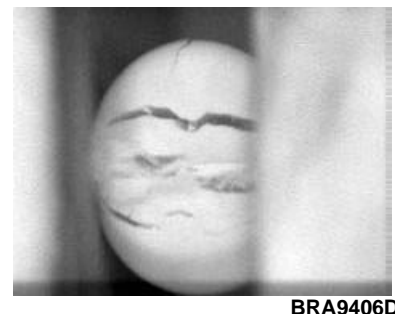
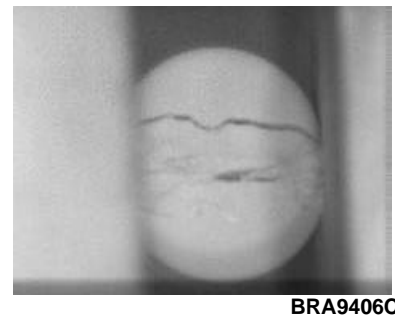
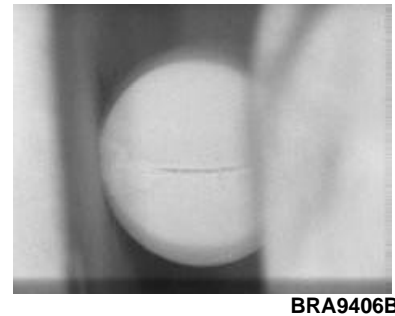
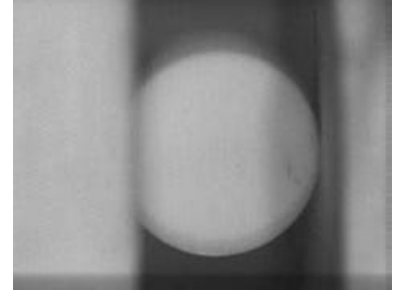
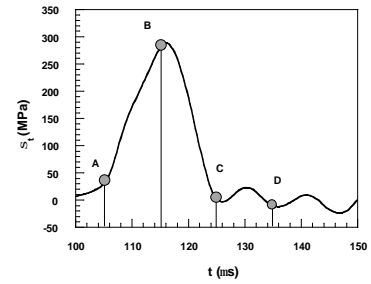
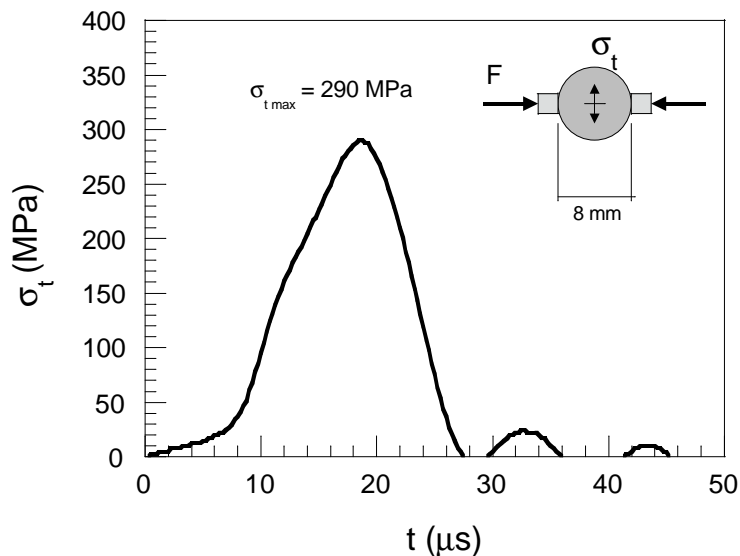
| Código de Ensayo: BRA9405 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 94% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m³ | Diámetro: 8.01 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 193 MPa | Longitud: 4.07 mm |
| Módulo de rotura ¹ 352 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Noviembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=500mm del extremo de impacto con el proyectil y del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9405A.TIF: exposición 2µs, retraso de 115 µs . | |
| BRA9405B.TIF: exposición 2µs, retraso de 120 µs . | |
| BRA9405C.TIF: exposición 2µs, retraso de 125 µs . | |
| BRA9405D.TIF: exposición 2µs, retraso de 135 µs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 15.1 kN. |
| Resistencia a tracción: | 294 MPa. |
| Velocidad de carga: | 25.8·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



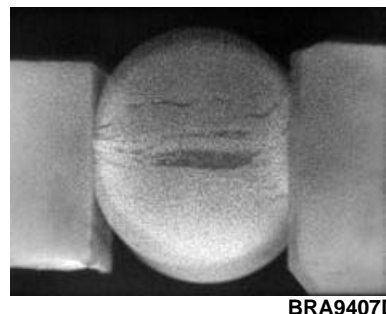
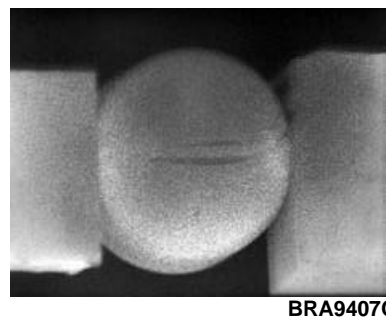
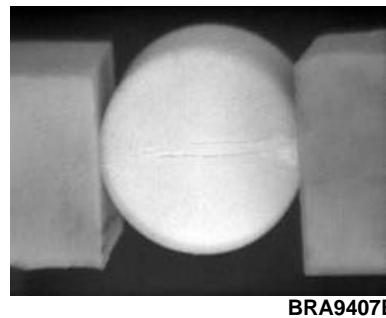
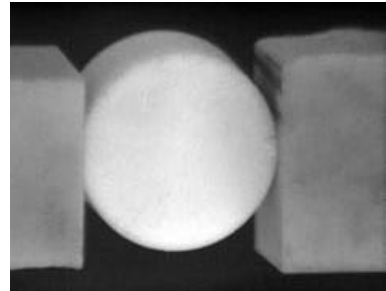
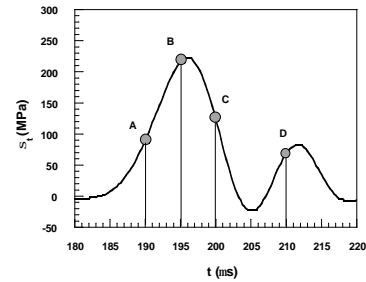
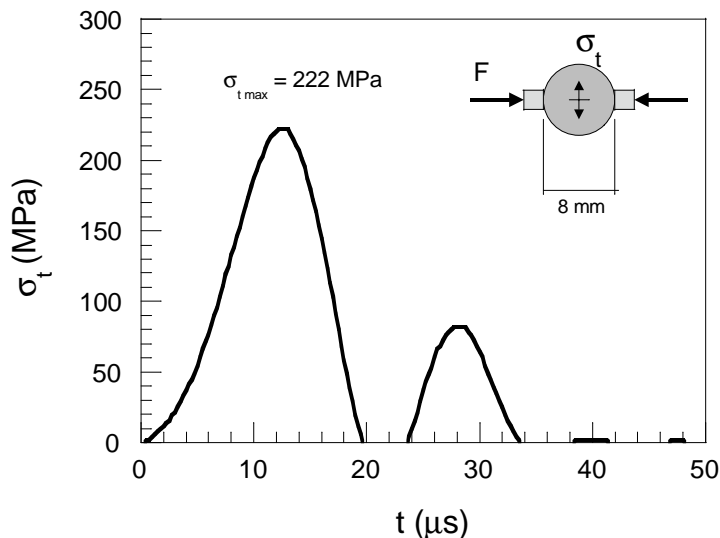
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRA9406 | |
| Material: Alúmina de 94% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m³ | Diámetro: 8.02 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 193 MPa | Longitud: 4.09 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 352 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Noviembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=500mm del extremo de impacto con el proyectil y del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9406A.TIF: exposición 2μs, retraso de 105 μs . | |
| BRA9406B.TIF: exposición 2μs, retraso de 115 μs . | |
| BRA9406C.TIF: exposición 2μs, retraso de 125 μs . | |
| BRA9406D.TIF: exposición 2μs, retraso de 135 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 15.0 kN. |
| Resistencia a tracción: | 290 MPa. |
| Velocidad de carga: | 23.6·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



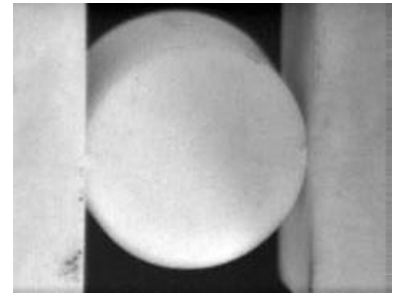
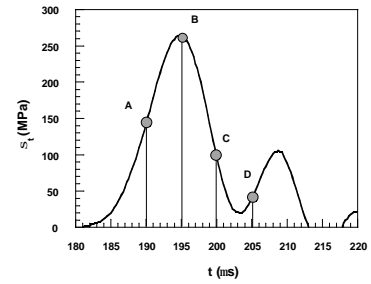
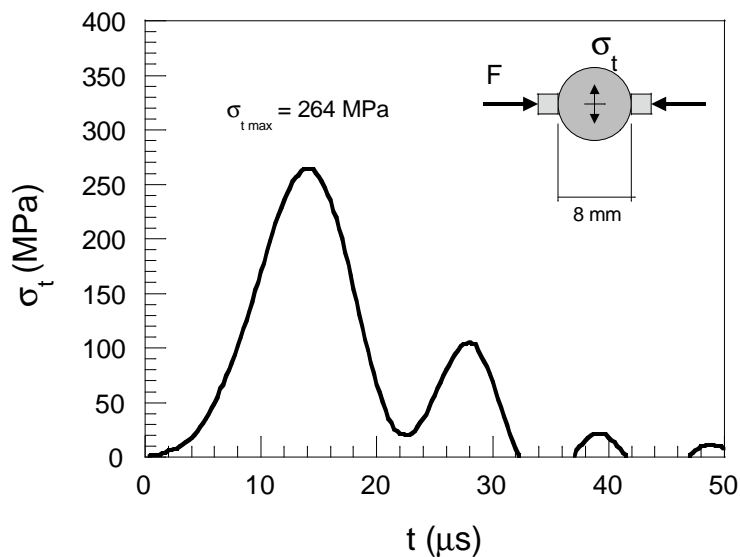
| Código de Ensayo: BRA9407 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 94% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m³ | Diámetro: 8.02 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 193 MPa | Longitud: 4.09 mm |
| Módulo de rotura ¹ 352 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 5 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9407A.TIF: exposición 1μs, retraso de 190 μs. | |
| BRA9407B.TIF: exposición 1μs, retraso de 195 μs. | |
| BRA9407C.TIF: exposición 1μs, retraso de 200 μs. | |
| BRA9407D.TIF: exposición 1μs, retraso de 210 μs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 11.5 kN. |
| Resistencia a tracción: | 222 MPa. |
| Velocidad de carga: | 27.0·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

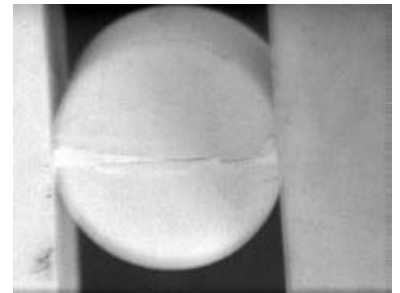


| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRA9409 | |
| Material: Alúmina de 94% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m³ | Diámetro: 8.01 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 193 MPa | Longitud: 4.08 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 352 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 5 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9409A.TIF: exposición 1μs, retraso de 190 μs . | |
| BRA9409B.TIF: exposición 1μs, retraso de 195 μs . | |
| BRA9409C.TIF: exposición 1μs, retraso de 200 μs . | |
| BRA9409D.TIF: exposición 1μs, retraso de 205 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 13.6 kN. |
| Resistencia a tracción: | 264 MPa. |
| Velocidad de carga: | 33.5·10⁶ MPa/s |

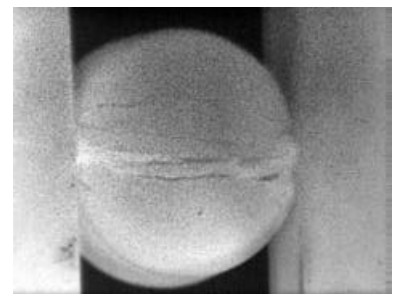
¹ Datos del fabricante



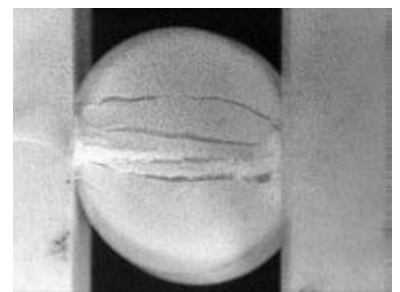
BRA9409A



BRA9409B



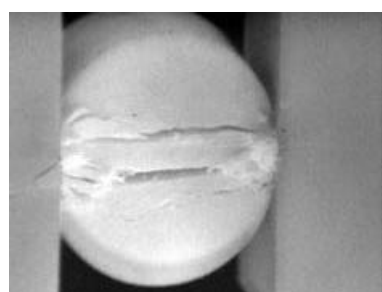
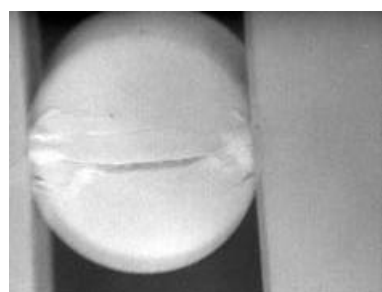
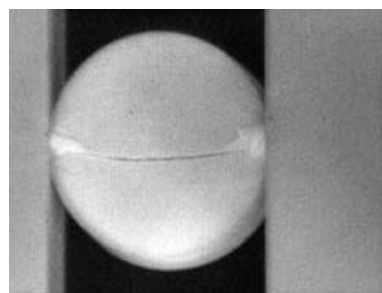
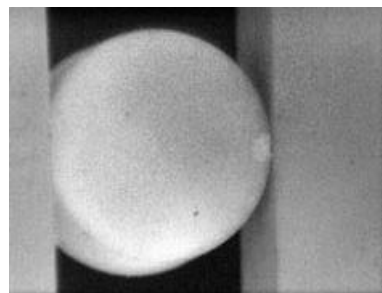
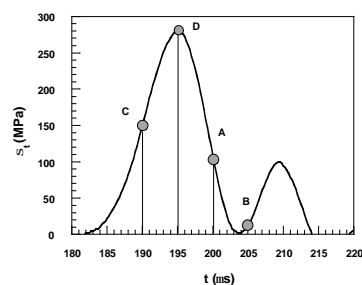
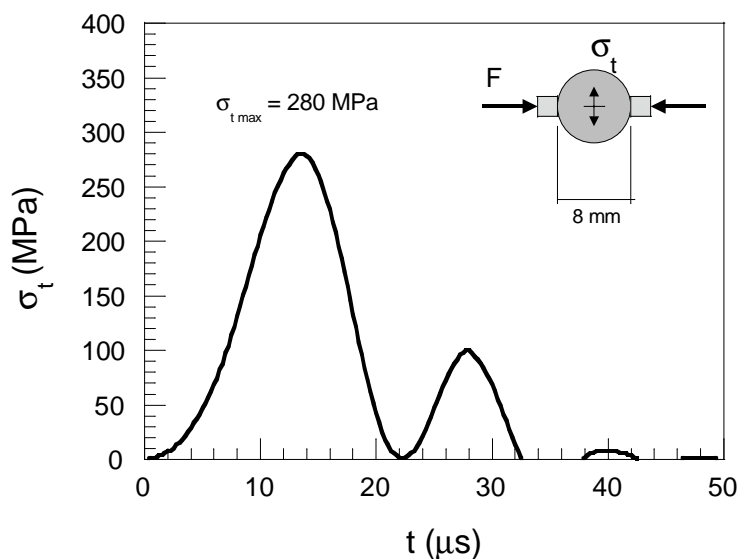
BRA9409C



BRA9409D

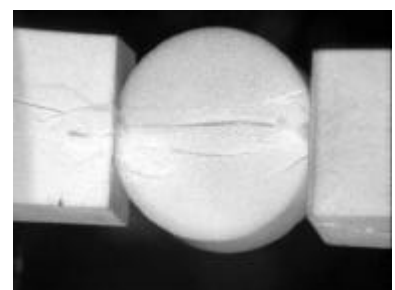
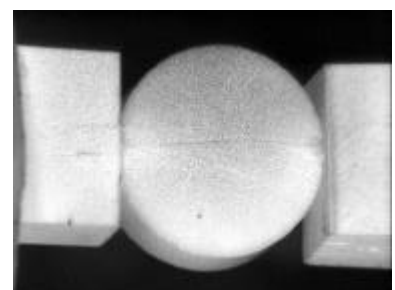
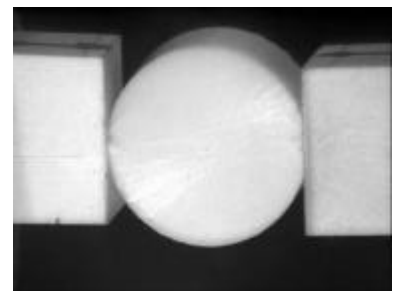
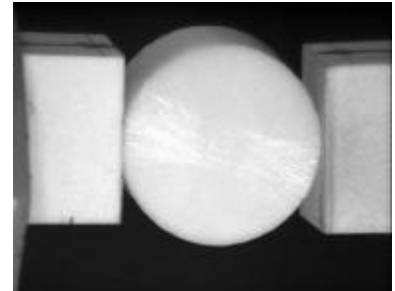
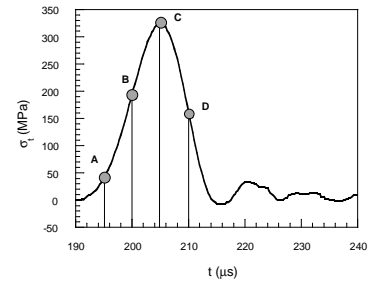
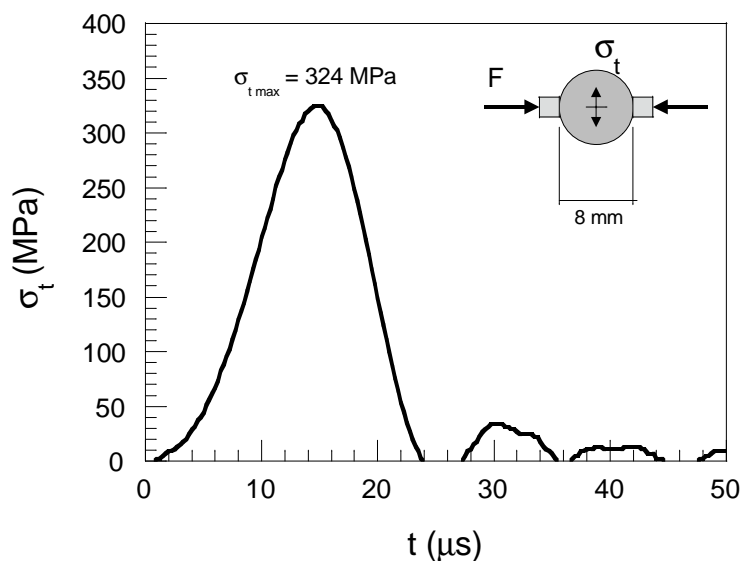
| Código de Ensayo: BRA9410 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 94% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 303 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3658 kg/m³ | Diámetro: 8.03 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 193 MPa | Longitud: 4.07 mm |
| Módulo de rotura ¹ 352 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 5 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9410A.TIF: exposición 1µs, retraso de 205 µs . | |
| BRA9410B.TIF: exposición 1µs, retraso de 200 µs . | |
| BRA9410C.TIF: exposición 1µs, retraso de 190 µs . | |
| BRA9410D.TIF: exposición 1µs, retraso de 195 µs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 14.4 kN. |
| Resistencia a tracción: | 280 MPa. |
| Velocidad de carga: | 35.0·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



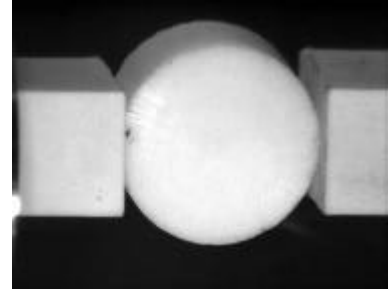
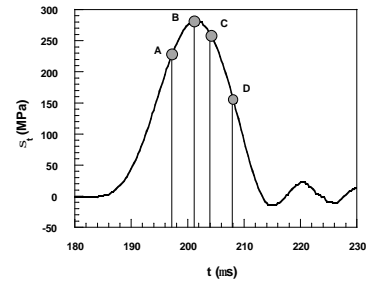
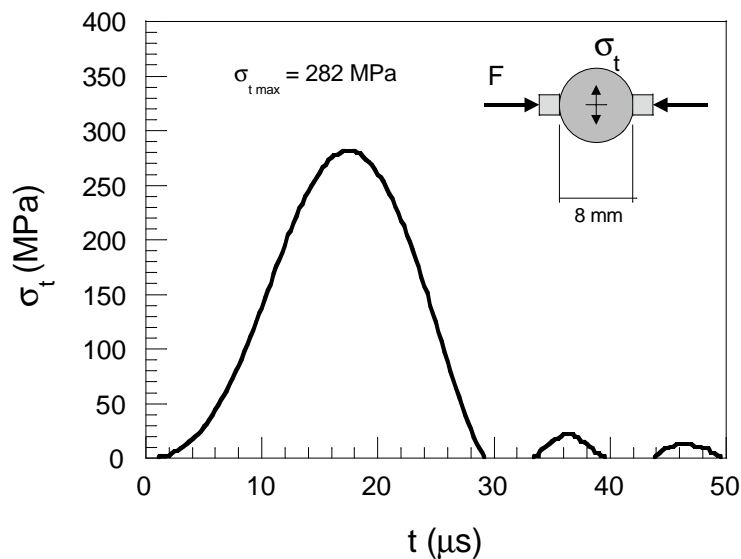
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRA9801 | |
| Material: Alúmina de 98 % de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 320 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRA9801A, exposición 2 μ s, retraso de 195 μ s. | |
| Cámara B: BRA9801B, exposición 2 μ s, retraso de 200 μ s. | |
| Cámara C: BRA9801C, exposición 2 μ s, retraso de 205 μ s. | |
| Cámara D: BRA9801D, exposición 2 μ s, retraso de 210 μ s. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 36.6 kN. |
| Resistencia a tracción: | 324 MPa. |
| Velocidad de carga: | 34.6·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

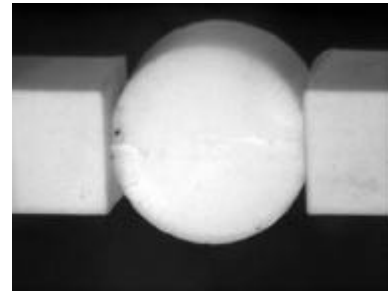


| Código de Ensayo: BRA9802 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 98 % de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 320 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRA9802A, exposición 2 μ s, retraso de 197 μ s. | |
| Cámara B: BRA9802B, exposición 2 μ s, retraso de 201 μ s. | |
| Cámara C: BRA9802C, exposición 2 μ s, retraso de 204 μ s. | |
| Cámara D: BRA9802D, exposición 2 μ s, retraso de 208 μ s. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 31.9 kN. |
| Resistencia a tracción: | 282 MPa. |
| Velocidad de carga: | 26.1·10⁶ MPa/s |

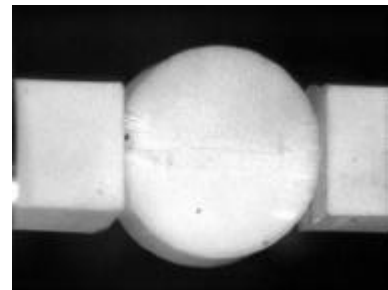
¹ Datos del fabricante



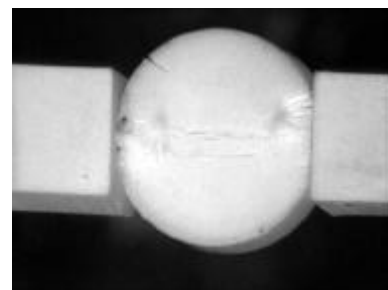
BRA9802A



BRA9802B



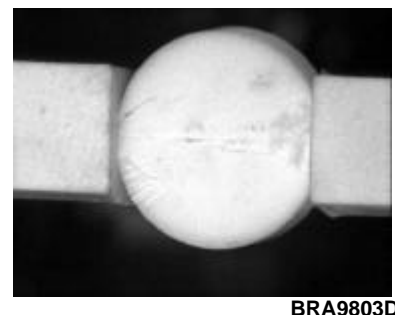
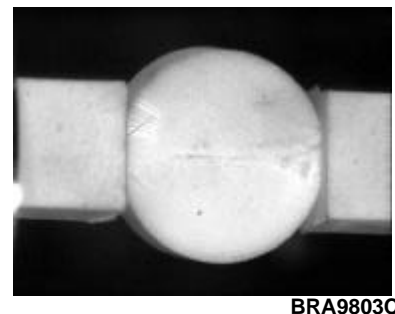
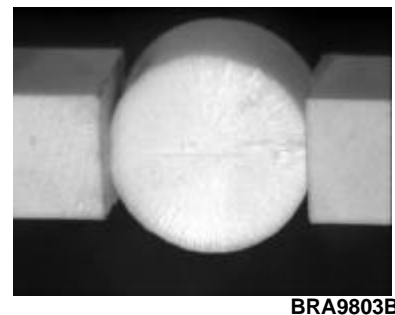
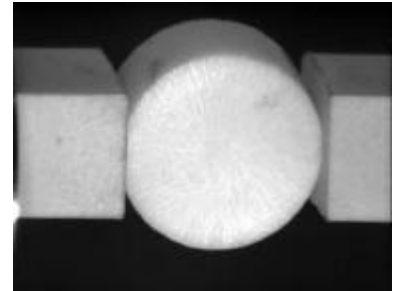
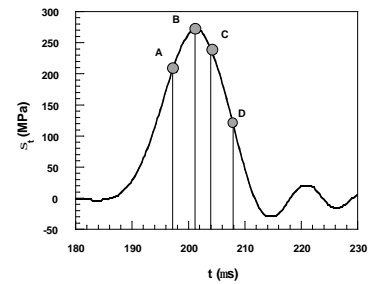
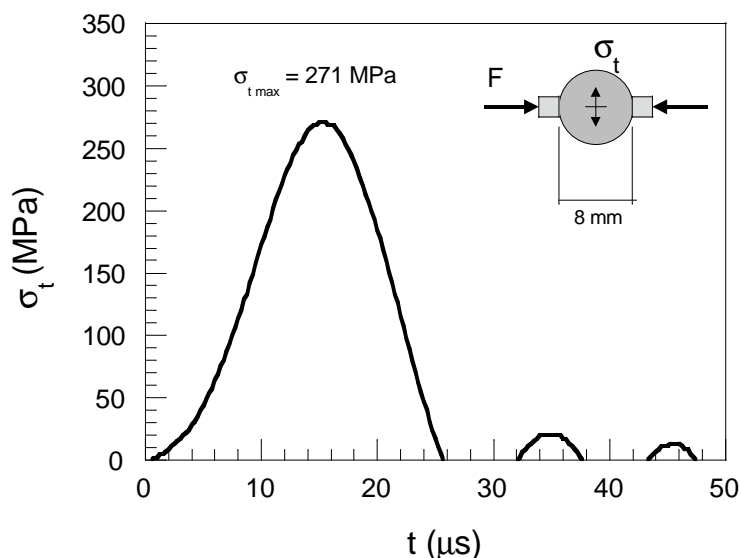
BRA9802C



BRA9802D

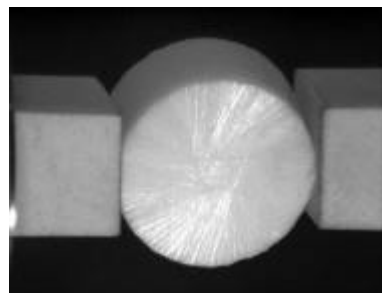
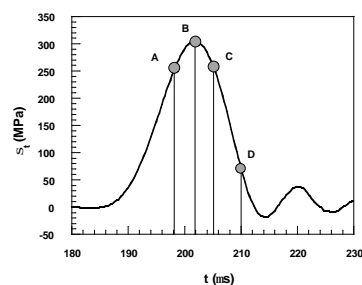
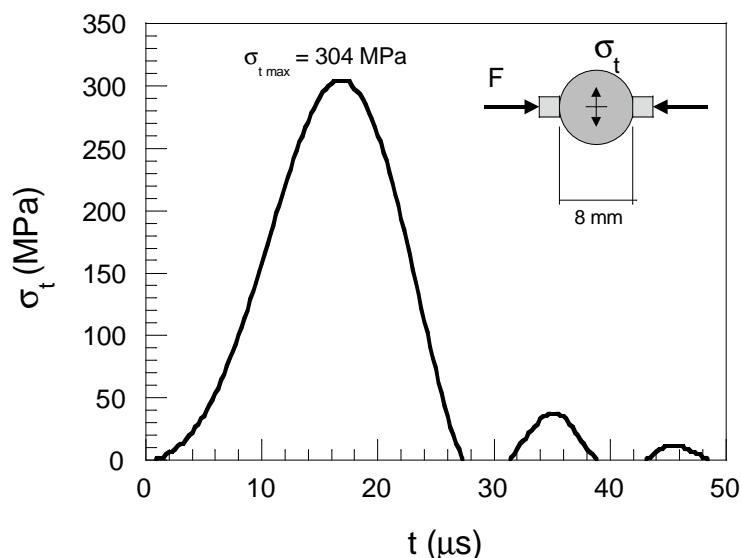
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRA9803 | |
| Material: Alúmina de 98 % de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 320 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRA9803A, exposición 2 μ s, retraso de 197 μ s. | |
| Cámara B: BRA9803B, exposición 2 μ s, retraso de 201 μ s. | |
| Cámara C: BRA9803C, exposición 2 μ s, retraso de 204 μ s. | |
| Cámara D: BRA9803D, exposición 2 μ s, retraso de 208 μ s. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 30.6 kN. |
| Resistencia a tracción: | 271 MPa. |
| Velocidad de carga: | 27.3·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

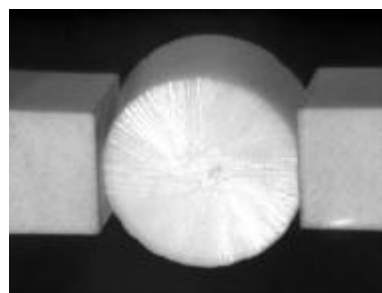


| Código de Ensayo: BRA9804 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 98 % de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 320 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRA9804A, exposición 2 μ s, retraso de 198 μ s. | |
| Cámara B: BRA9804B, exposición 2 μ s, retraso de 202 μ s. | |
| Cámara C: BRA9804C, exposición 2 μ s, retraso de 205 μ s. | |
| Cámara D: BRA9804D, exposición 2 μ s, retraso de 210 μ s. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 34.4 kN. |
| Resistencia a tracción: | 304 MPa. |
| Velocidad de carga: | 28.5·10⁶ MPa/s |

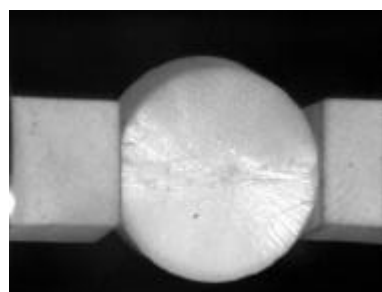
¹ Datos del fabricante



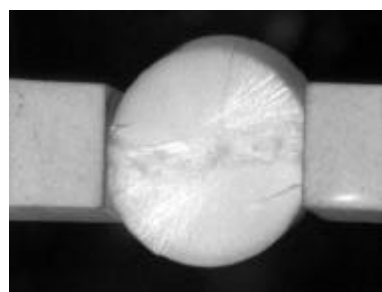
BRA9804A



BRA9804B



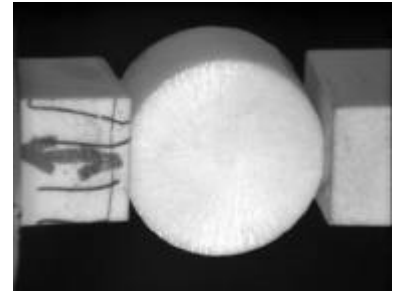
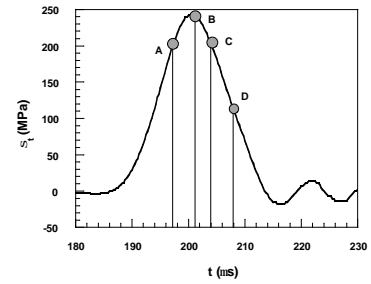
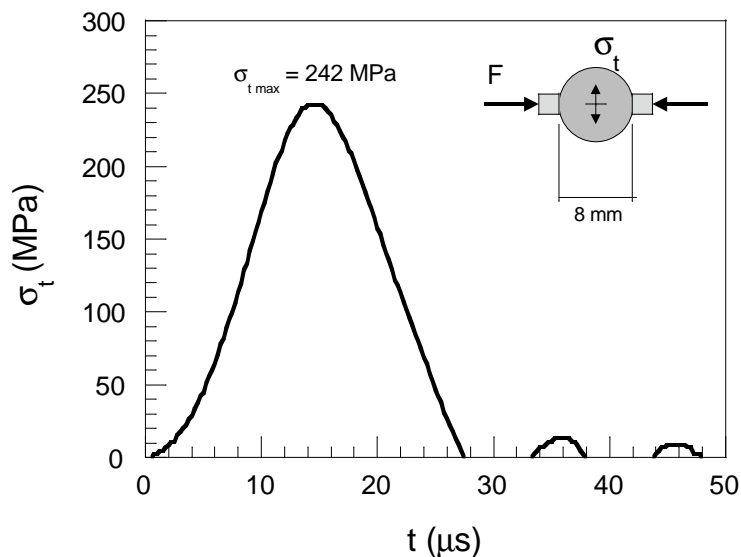
BRA9804C



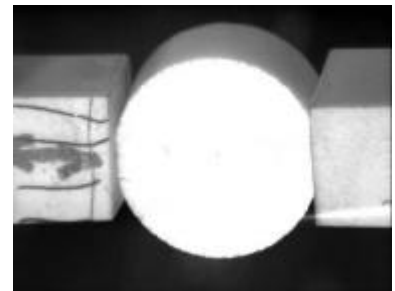
BRA9804D

| Código de Ensayo: BRA9805 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 98 % de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 320 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRA9805A, exposición 2 μ s, retraso de 198 μ s. | |
| Cámara B: BRA9805B, exposición 2 μ s, retraso de 202 μ s. | |
| Cámara C: BRA9805C, exposición 2 μ s, retraso de 205 μ s. | |
| Cámara D: BRA9805D, exposición 2 μ s, retraso de 210 μ s. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 27.3 kN. |
| Resistencia a tracción: | 242 MPa. |
| Velocidad de carga: | 25.3·10⁶ MPa/s |

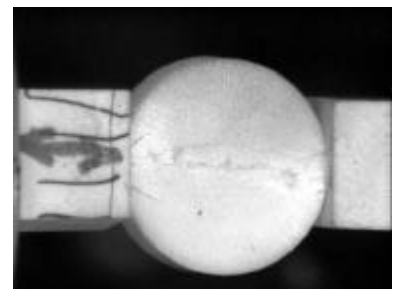
¹ Datos del fabricante



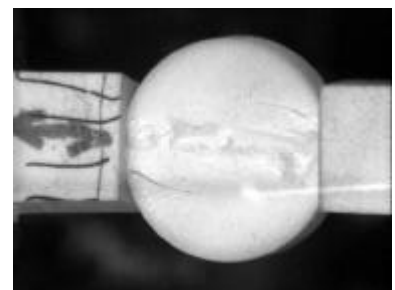
BRA9805A



BRA9805B



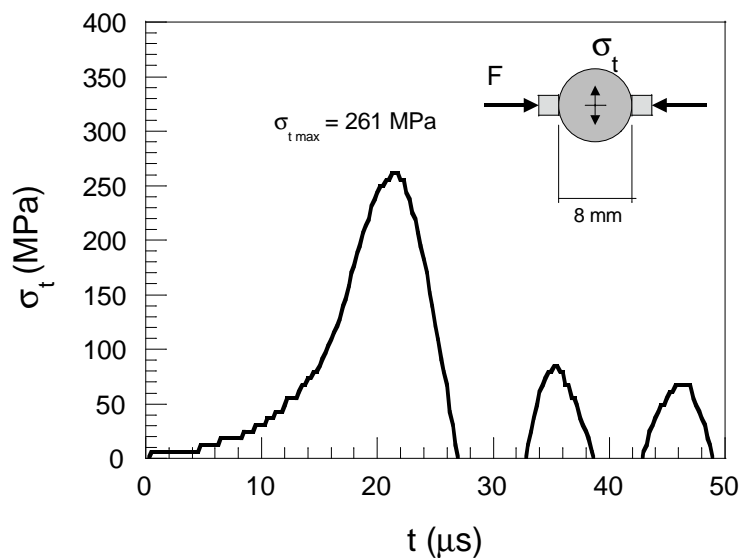
BRA9805C



BRA9805D

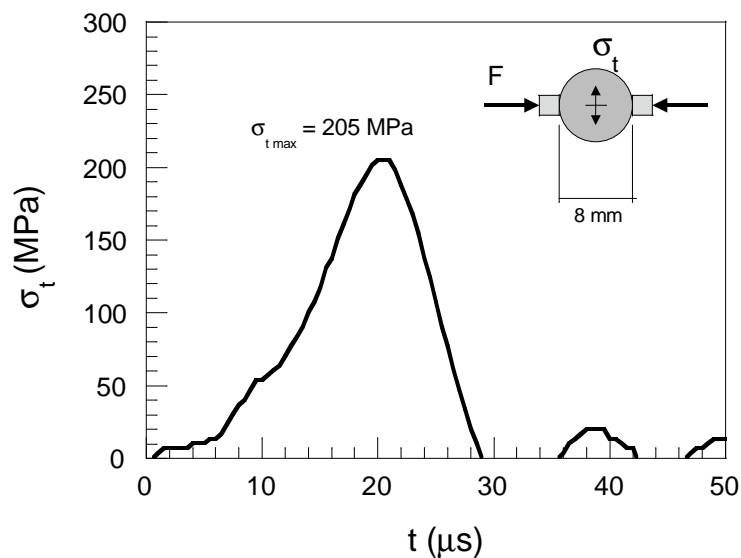
| | |
|---|--------------------------------|
| Código de Ensayo: BRA9901 | |
| Material: Alúmina de 99.5% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 262 MPa | Longitud: 3.96 mm |
| Módulo de rotura ¹ 379 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Noviembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1000 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| No se obtuvieron fotografías. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: 13.0 kN. | |
| Resistencia a tracción: 261 MPa. | |
| Velocidad de carga: 33.9·10⁶ MPa/s | |

¹ Datos del fabricante



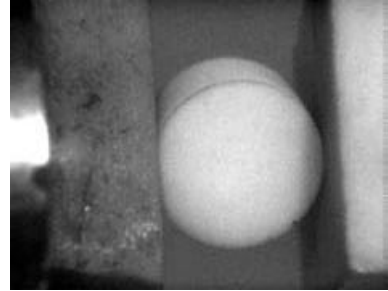
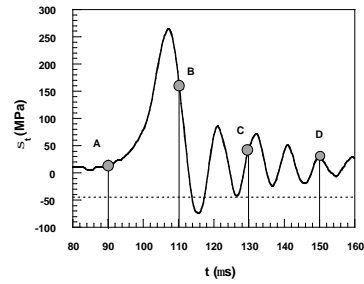
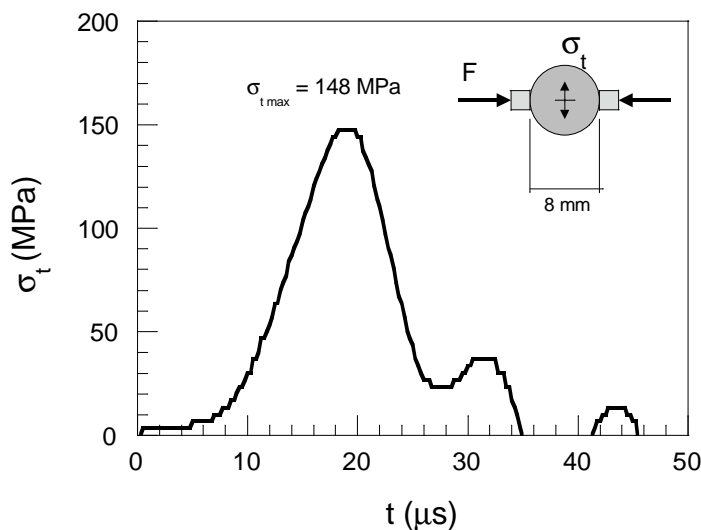
| Código de Ensayo: BRA9902 | |
|---|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 99.5% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m³ | Diámetro: 7.96 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 262 MPa | Longitud: 3.99 mm |
| Módulo de rotura ¹ 379 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Noviembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1800 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| No se obtuvieron fotografías. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 10.2 kN. |
| Resistencia a tracción: | 205 MPa. |
| Velocidad de carga: | 18.9·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

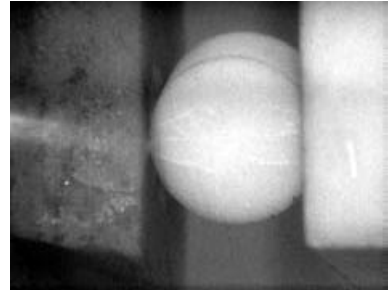


| Código de Ensayo: BRA9903 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 99.5% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 262 MPa | Longitud: 3.99 mm |
| Módulo de rotura ¹ 379 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Noviembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1800 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. Aparecen roturas en las protecciones antes que en la probeta. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=500mm del extremo de impacto con el proyectil y del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9903A.TIF: exposición 2µs, retraso de 90 µs. | |
| BRA9903B.TIF: exposición 2µs, retraso de 110 µs. | |
| BRA9903C.TIF: exposición 2µs, retraso de 130 µs. | |
| BRA9903D.TIF: exposición 2µs, retraso de 150 µs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 7.4 kN. |
| Resistencia a tracción: | 148 MPa. |
| Velocidad de carga: | 15.7·10⁶ MPa/s |

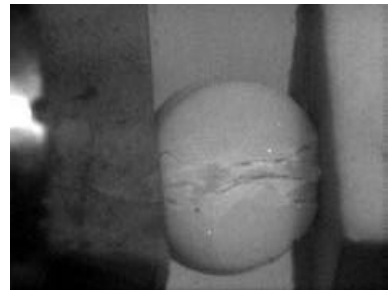
¹ Datos del fabricante



BRA9903A



BRA9903B



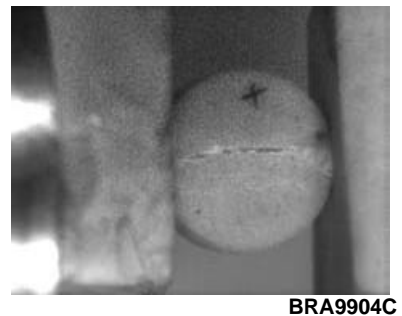
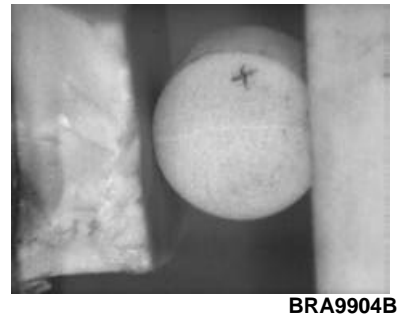
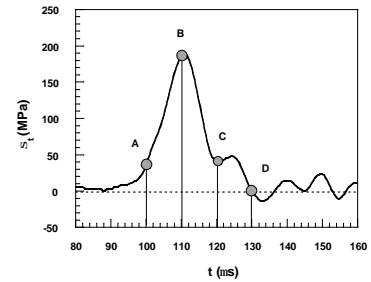
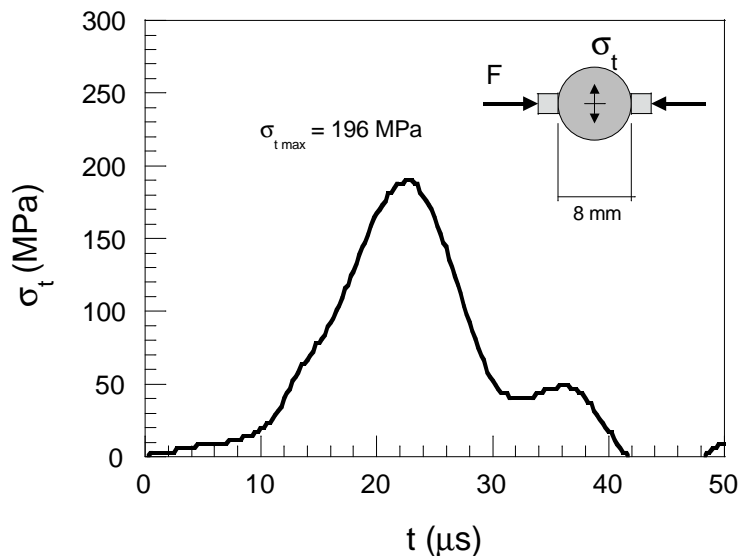
BRA9903C



BRA9903D

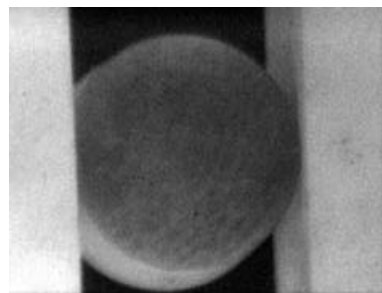
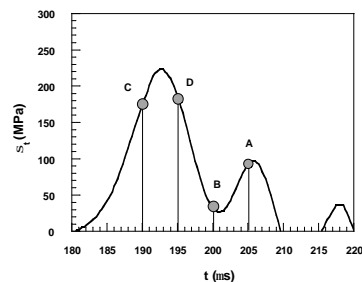
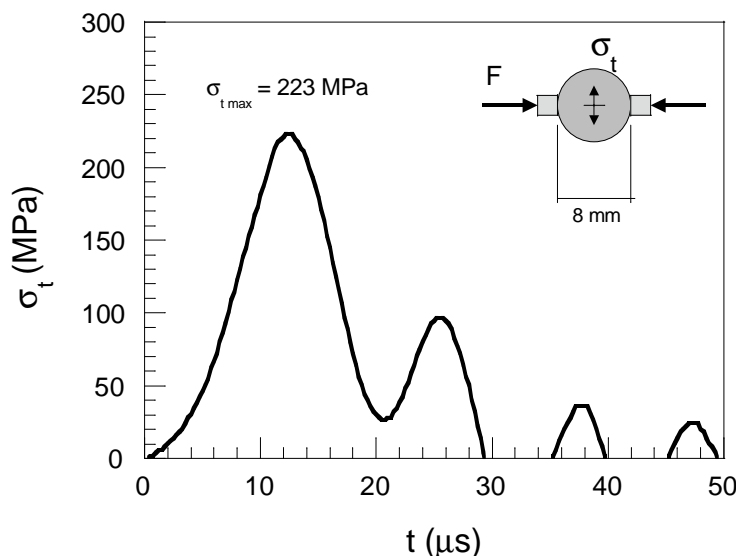
| Código de Ensayo: BRA9904 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 99.5% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m³ | Diámetro: 7.96 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 262 MPa | Longitud: 3.98 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 379 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Noviembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2100 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=500mm del extremo de impacto con el proyectil y del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9904A.TIF: exposición 2μs, retraso de 100 μs. | |
| BRA9904B.TIF: exposición 2μs, retraso de 110 μs. | |
| BRA9904C.TIF: exposición 2μs, retraso de 120 μs. | |
| BRA9904D.TIF: exposición 2μs, retraso de 130 μs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 9.8 kN. |
| Resistencia a tracción: | 196 MPa. |
| Velocidad de carga: | 16.1·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

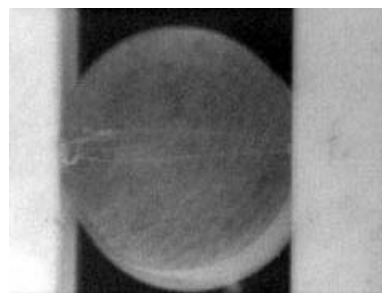


| Código de Ensayo: BRA9906 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 99.5% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 262 MPa | Longitud: 3.99 mm |
| Módulo de rotura ¹ 379 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 7 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. La probeta se pinto de negro para dar mas contraste en las fotografías. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9906A.TIF: exposición 1µs, retraso de 205 µs. | |
| BRA9906B.TIF: exposición 1µs, retraso de 200 µs. | |
| BRA9906C.TIF: exposición 1µs, retraso de 190 µs. | |
| BRA9906D.TIF: exposición 1µs, retraso de 195 µs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 11.2 kN. |
| Resistencia a tracción: | 223 MPa. |
| Velocidad de carga: | 28.4·10⁶ MPa/s |

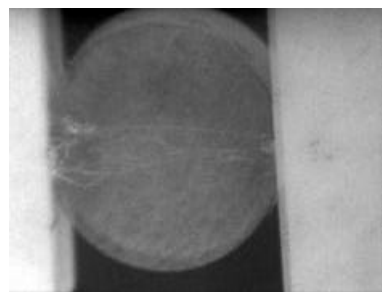
¹ Datos del fabricante



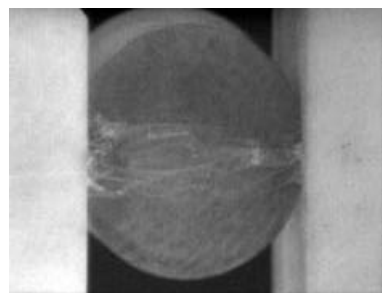
BRA9906C



BRA9906D



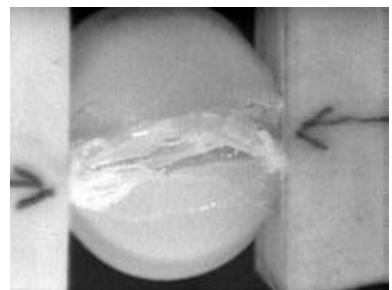
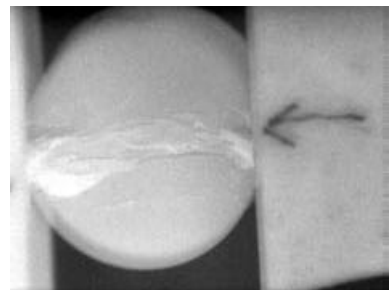
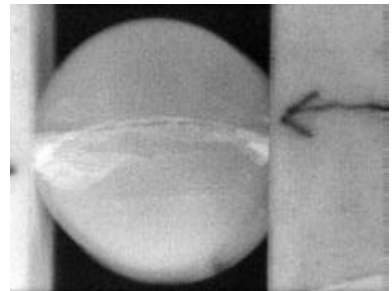
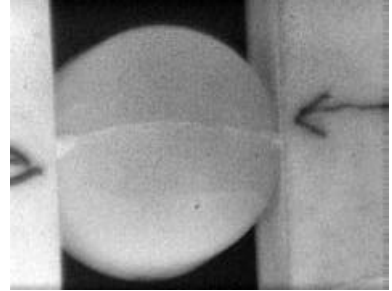
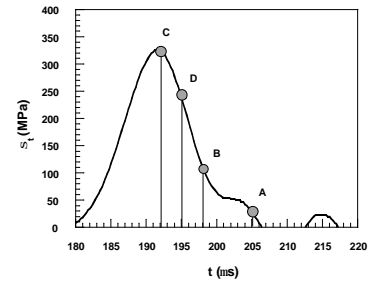
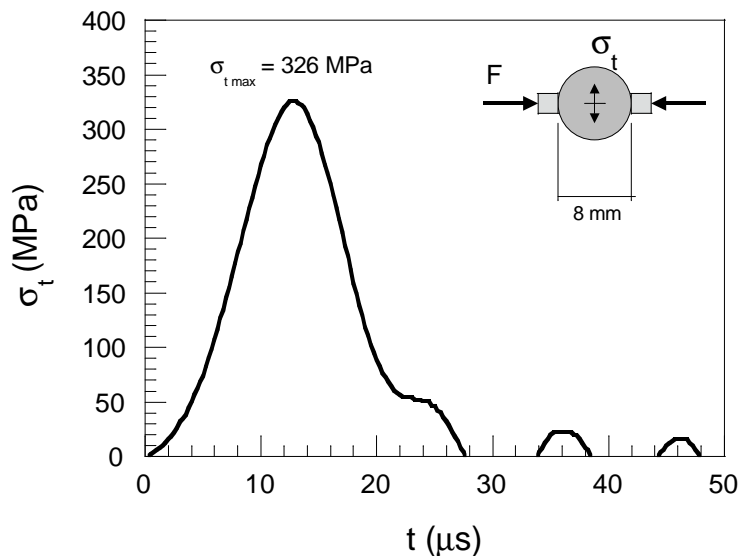
BRA9906B



BRA9906A

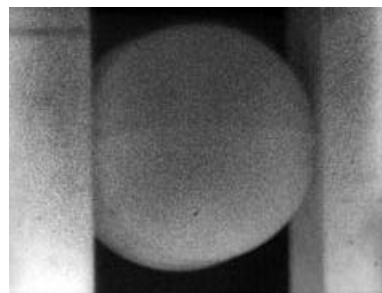
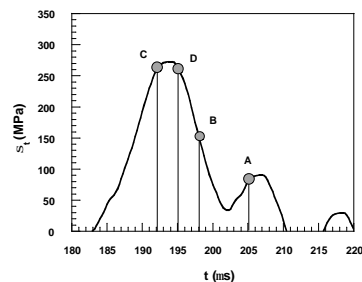
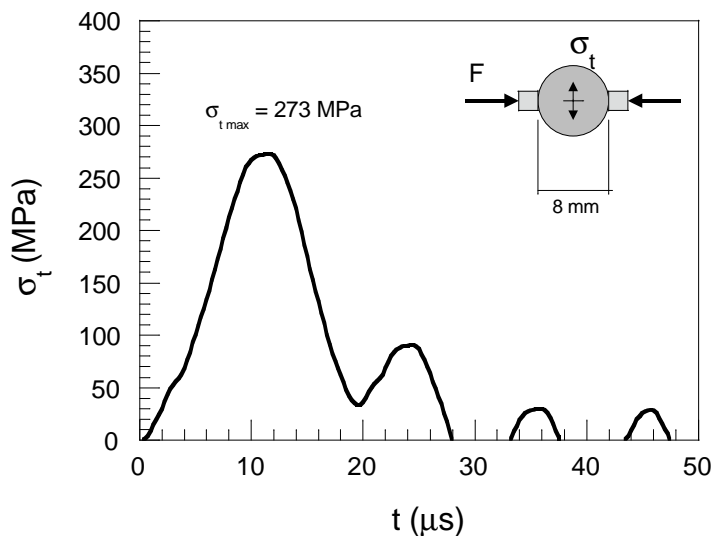
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRA9907 | |
| Material: Alúmina de 99.5% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 262 MPa | Longitud: 3.99 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 379 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 7 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9907A.TIF: exposición 1µs, retraso de 205 µs . | |
| BRA9907B.TIF: exposición 1µs, retraso de 198 µs . | |
| BRA9907C.TIF: exposición 1µs, retraso de 192 µs . | |
| BRA9907D.TIF: exposición 1µs, retraso de 195 µs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 16.3 kN. |
| Resistencia a tracción: | 326 MPa. |
| Velocidad de carga: | 39.0·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

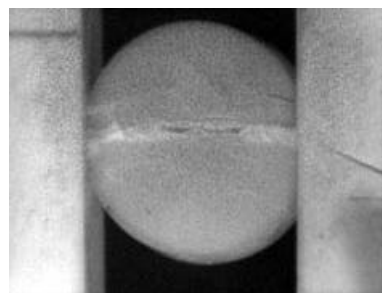


| Código de Ensayo: BRA9908 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 99.5% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 262 MPa | Longitud: 3.97 mm |
| Módulo de rotura ¹ 379 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 7 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9908A.TIF: exposición 1μs, retraso de 205 μs. | |
| BRA9908B.TIF: exposición 1μs, retraso de 198 μs. | |
| BRA9908C.TIF: exposición 1μs, retraso de 192 μs. | |
| BRA9908D.TIF: exposición 1μs, retraso de 195 μs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 13.6 kN. |
| Resistencia a tracción: | 273 MPa. |
| Velocidad de carga: | 36.3·10⁶ MPa/s |

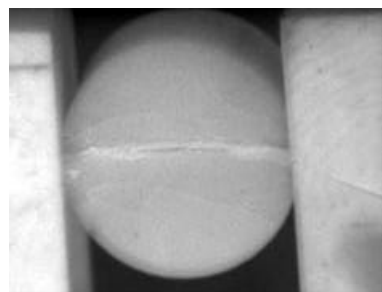
¹ Datos del fabricante



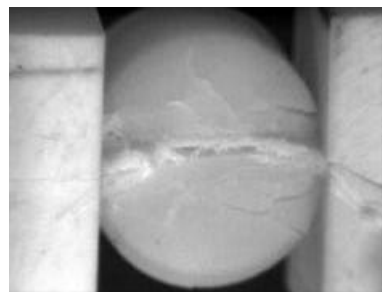
BRA9908C



BRA9908D



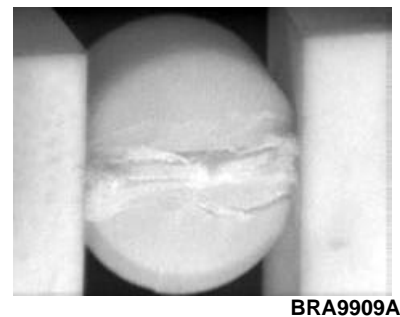
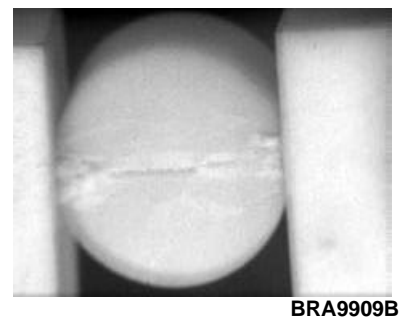
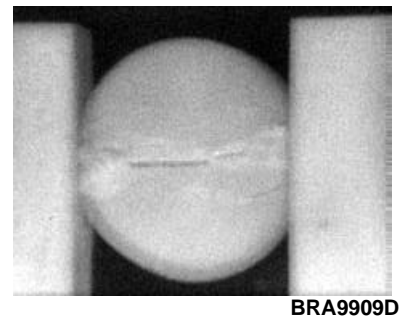
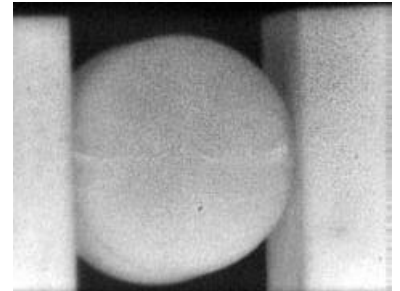
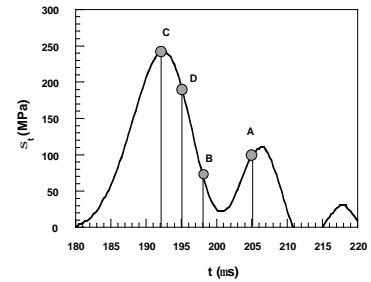
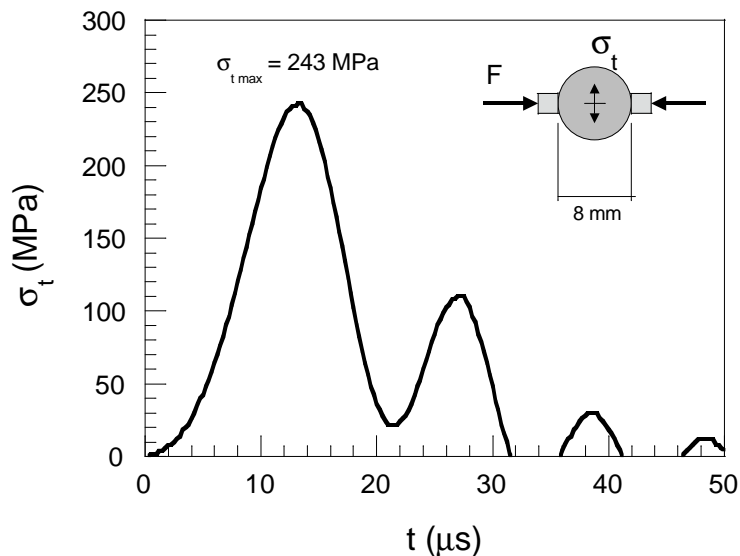
BRA9908B



BRA9908A

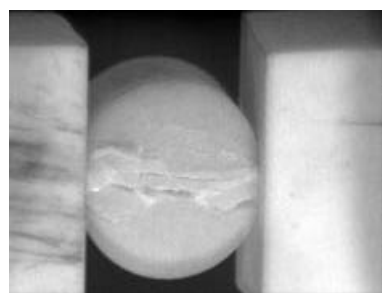
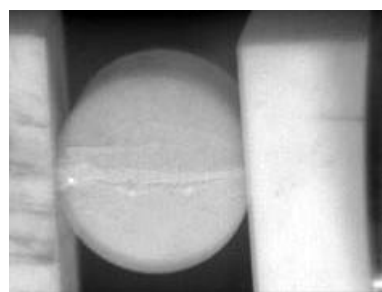
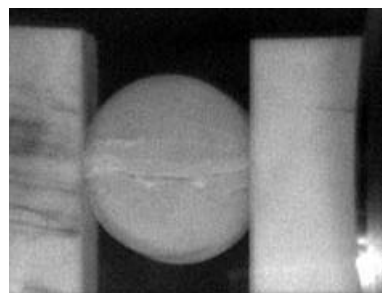
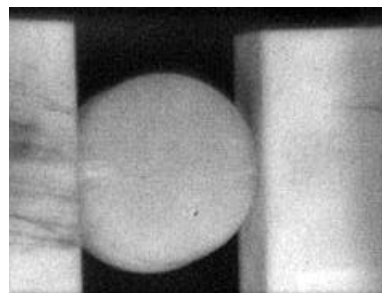
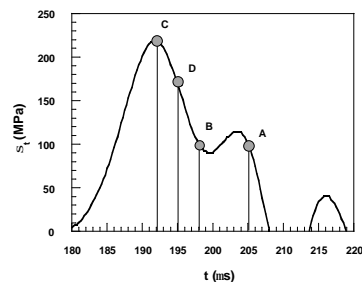
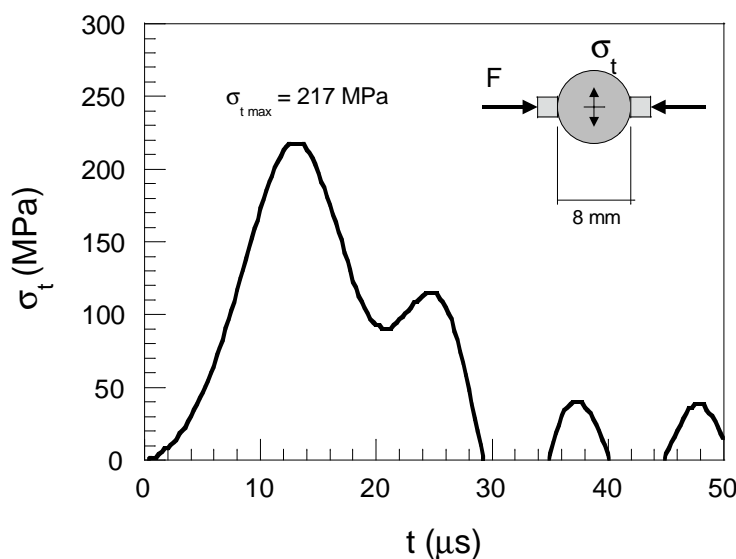
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRA9909 | |
| Material: Alúmina de 99.5% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 262 MPa | Longitud: 4.00 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 379 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 7 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9909A.TIF: exposición 1µs, retraso de 205 µs. | |
| BRA9909B.TIF: exposición 1µs, retraso de 198 µs. | |
| BRA9909C.TIF: exposición 1µs, retraso de 192 µs. | |
| BRA9909D.TIF: exposición 1µs, retraso de 195 µs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 12.2 kN. |
| Resistencia a tracción: | 243 MPa. |
| Velocidad de carga: | 30.1·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

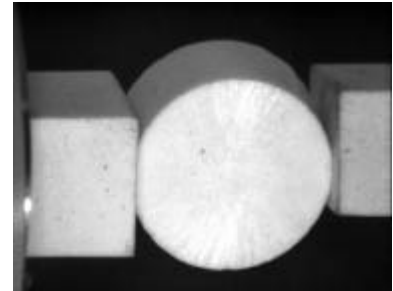
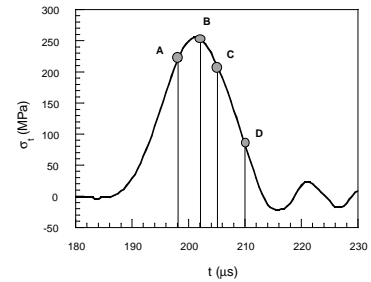


| Código de Ensayo: BRA9910 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina de 99.5% de pureza | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 391 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3905 kg/m³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 262 MPa | Longitud: 3.99 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 379 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 7 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRA9910A.TIF: exposición 1µs, retraso de 205 µs. | |
| BRA9910B.TIF: exposición 1µs, retraso de 198 µs. | |
| BRA9910C.TIF: exposición 1µs, retraso de 192 µs. | |
| BRA9910D.TIF: exposición 1µs, retraso de 195 µs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 10.9 kN. |
| Resistencia a tracción: | 217 MPa. |
| Velocidad de carga: | 27.1·10⁶ MPa/s |

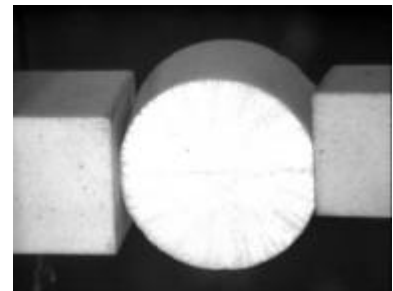
¹ Datos del fabricante



| Código de Ensayo: BRAZR01 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina con zirconia. | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción: Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura: Sin datos. | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRAZR01A, exposición 2 μs , retraso de 198 μs . | |
| Cámara B: BRAZR01B, exposición 2 μs , retraso de 202 μs . | |
| Cámara C: BRAZR01C, exposición 2 μs , retraso de 205 μs . | |
| Cámara D: BRAZR01D, exposición 2 μs , retraso de 210 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 28.8 kN. |
| Resistencia a tracción: | 255 MPa. |
| Velocidad de carga: | 25.9·10⁶ MPa/s |



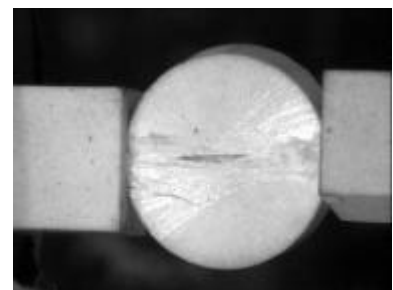
BRAZR01A



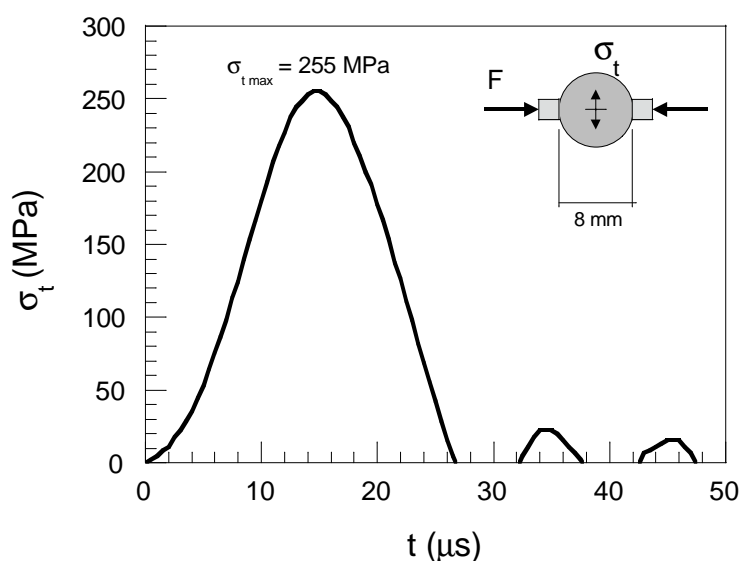
BRAZR01B



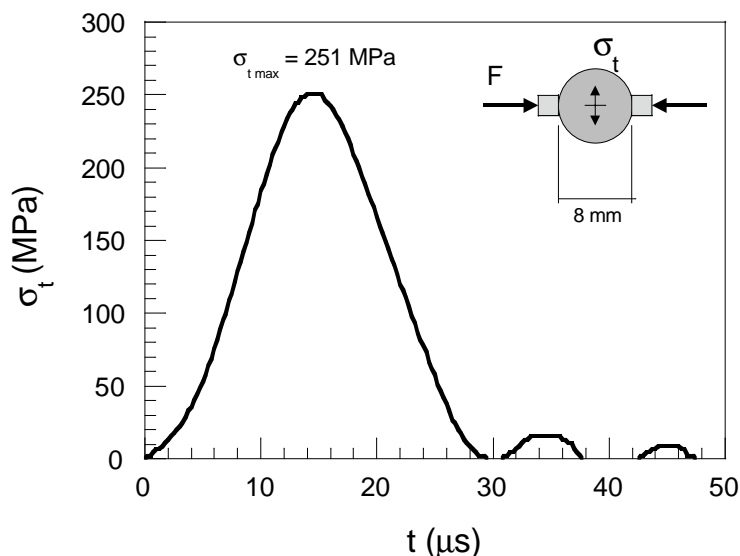
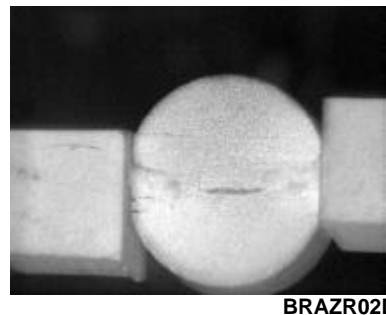
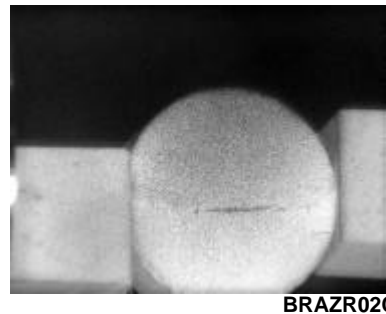
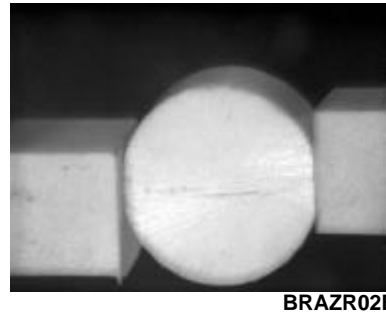
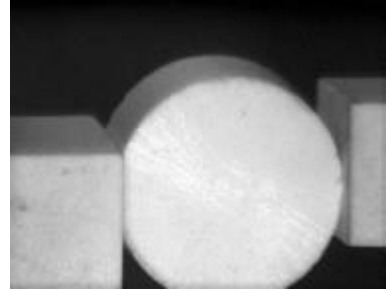
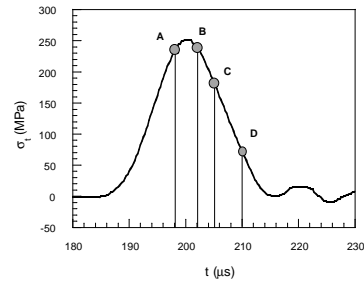
BRAZR01C



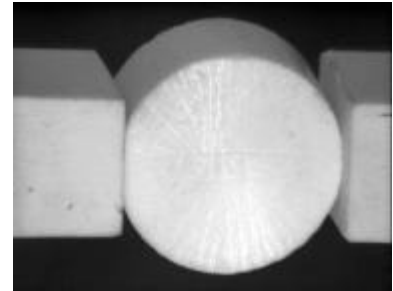
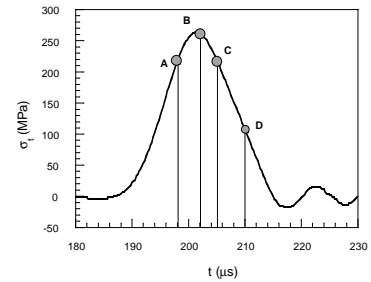
BRAZR01D



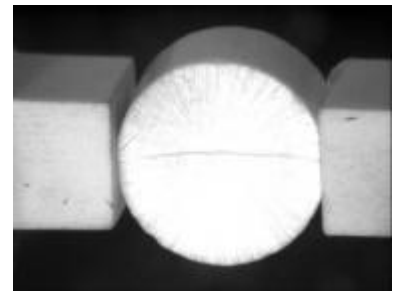
| Código de Ensayo: BRAZR02 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina con zirconia. | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción: Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura: Sin datos. | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRAZR02A, exposición 2 μs , retraso de 198 μs . | |
| Cámara B: BRAZR02B, exposición 2 μs , retraso de 202 μs . | |
| Cámara C: BRAZR02C, exposición 2 μs , retraso de 205 μs . | |
| Cámara D: BRAZR02D, exposición 2 μs , retraso de 210 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 28.4 kN. |
| Resistencia a tracción: | 251 MPa. |
| Velocidad de carga: | 25.9·10⁶ MPa/s |



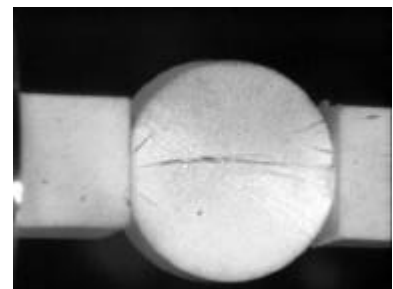
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRAZR03 | |
| Material: Alúmina con zirconia. | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción: Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura: Sin datos. | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRAZR03A, exposición 2 μs , retraso de 198 μs . | |
| Cámara B: BRAZR03B, exposición 2 μs , retraso de 202 μs . | |
| Cámara C: BRAZR03C, exposición 2 μs , retraso de 205 μs . | |
| Cámara D: BRAZR03D, exposición 2 μs , retraso de 210 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 29.9 kN. |
| Resistencia a tracción: | 264 MPa. |
| Velocidad de carga: | 27.6·10⁶ MPa/s |



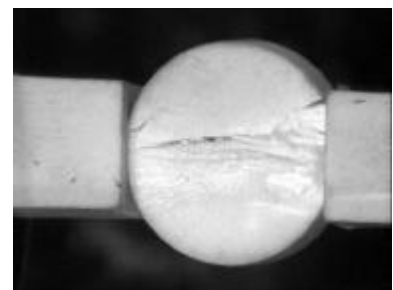
BRAZR03A



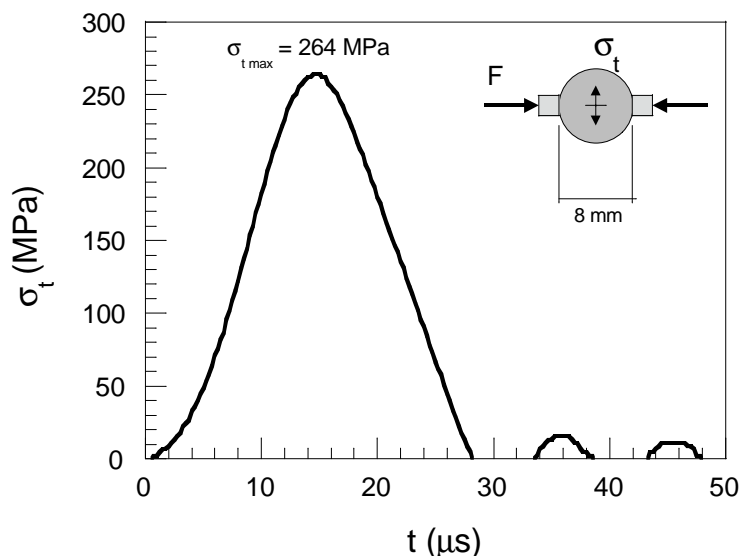
BRAZR03B



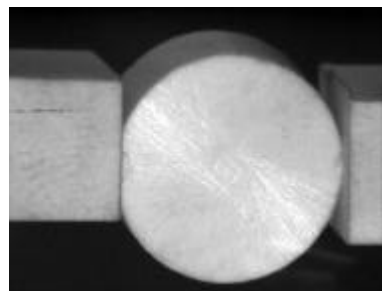
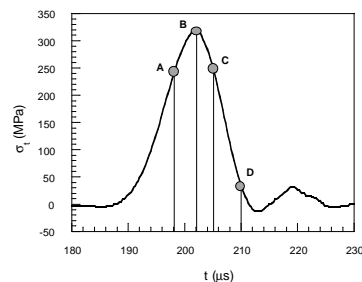
BRAZR03C



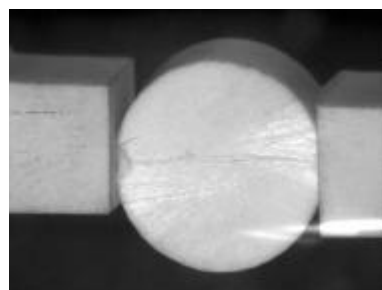
BRAZR03D



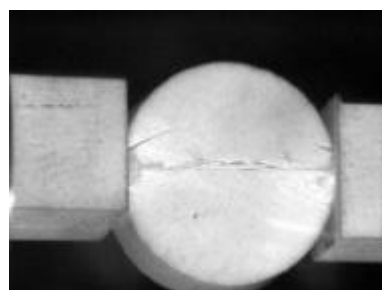
| Código de Ensayo: BRAZR04 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina con zirconia. | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción: Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura: Sin datos. | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRAZR04A, exposición 2 μ s, retraso de 198 μ s. | |
| Cámara B: BRAZR04B, exposición 2 μ s, retraso de 202 μ s. | |
| Cámara C: BRAZR04C, exposición 2 μ s, retraso de 205 μ s. | |
| Cámara D: BRAZR04D, exposición 2 μ s, retraso de 210 μ s. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 36.0 kN. |
| Resistencia a tracción: | 318 MPa. |
| Velocidad de carga: | 33.5·10⁶ MPa/s |



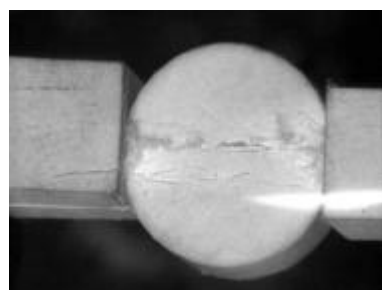
BRAZR04A



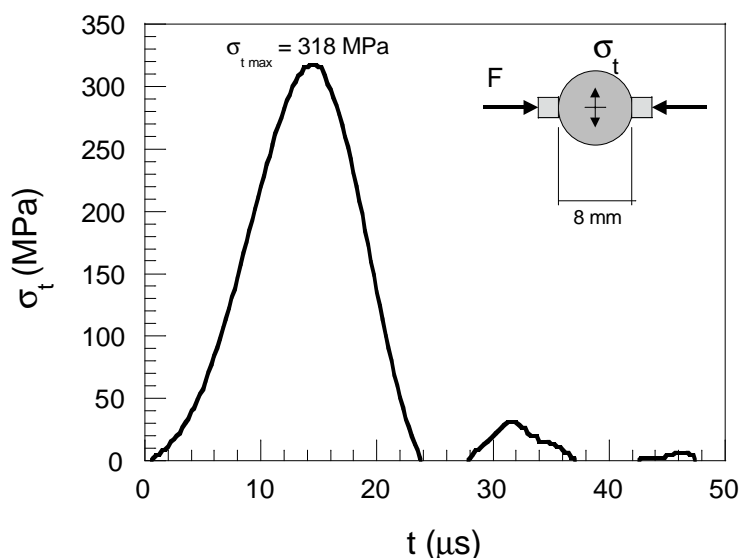
BRAZR04B



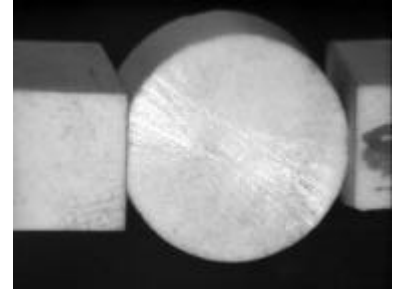
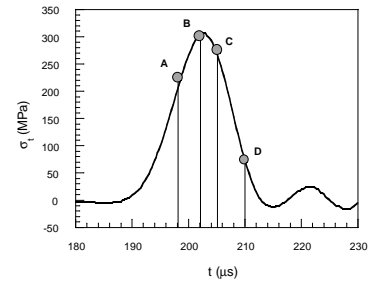
BRAZR04C



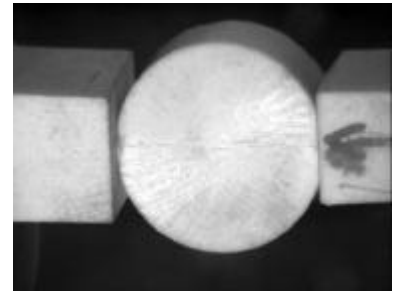
BRAZR04D



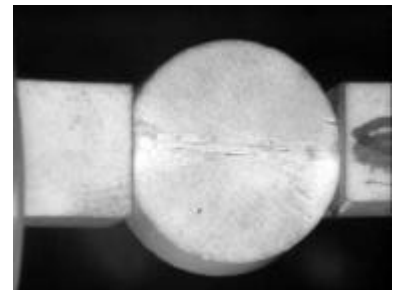
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRAZR05 | |
| Material: Alúmina con zirconia. | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción: Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura: Sin datos. | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRAZR05A, exposición 2 μs , retraso de 198 μs . | |
| Cámara B: BRAZR05B, exposición 2 μs , retraso de 202 μs . | |
| Cámara C: BRAZR05C, exposición 2 μs , retraso de 205 μs . | |
| Cámara D: BRAZR05D, exposición 2 μs , retraso de 210 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 34.6 kN. |
| Resistencia a tracción: | 306 MPa. |
| Velocidad de carga: | 32.1·10⁶ MPa/s |



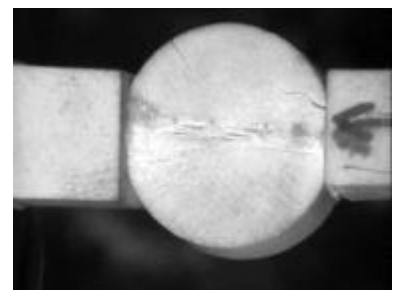
BRAZR05A



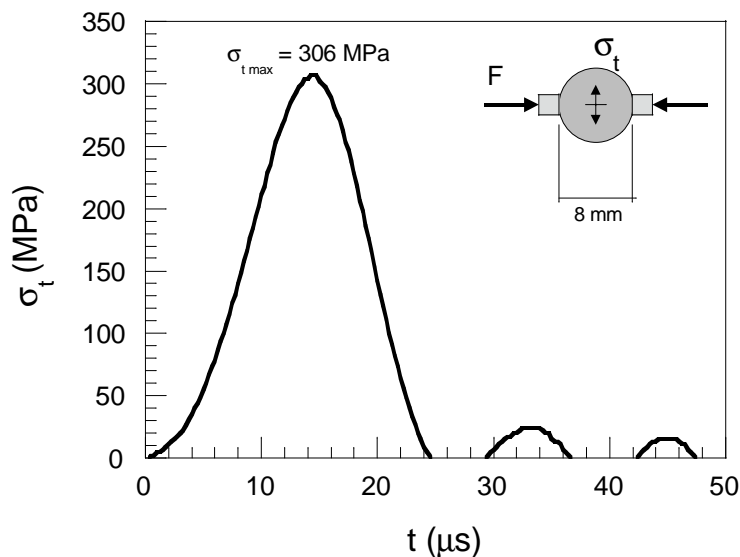
BRAZR05B



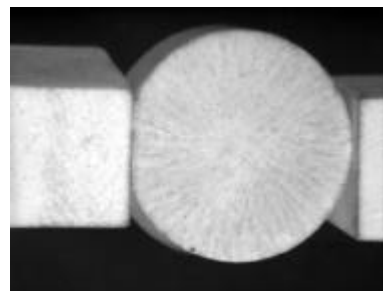
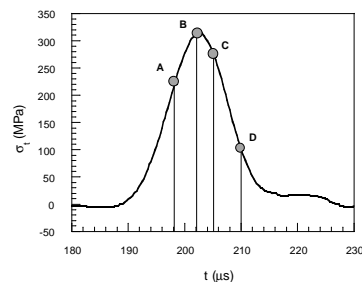
BRAZR05C



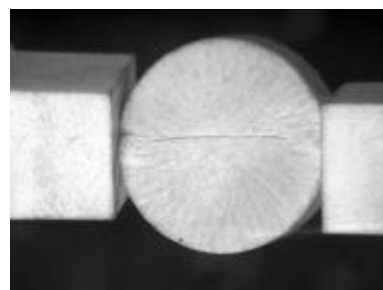
BRAZR05D



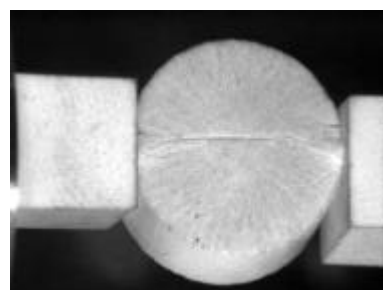
| Código de Ensayo: BRAZR06 | |
|--|----------------------------------|
| Material: Alúmina con zirconia. | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción: Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura: Sin datos. | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 11 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| Cámara A: BRAZR06A, exposición 2 μ s, retraso de 198 μ s. | |
| Cámara B: BRAZR06B, exposición 2 μ s, retraso de 202 μ s. | |
| Cámara C: BRAZR06C, exposición 2 μ s, retraso de 205 μ s. | |
| Cámara D: BRAZR06D, exposición 2 μ s, retraso de 210 μ s. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 35.6 kN. |
| Resistencia a tracción: | 315 MPa. |
| Velocidad de carga: | 34.3·10⁶ MPa/s |



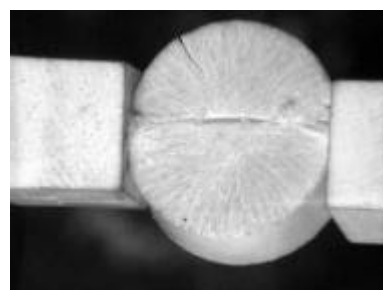
BRAZR06A



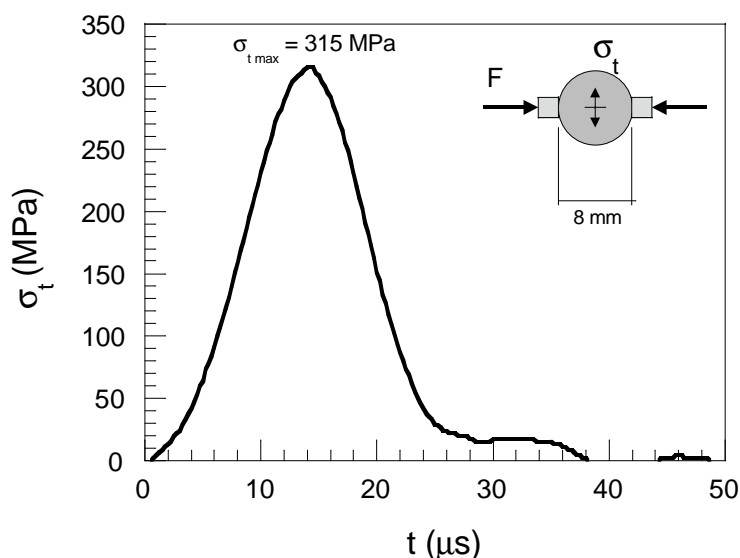
BRAZR06B



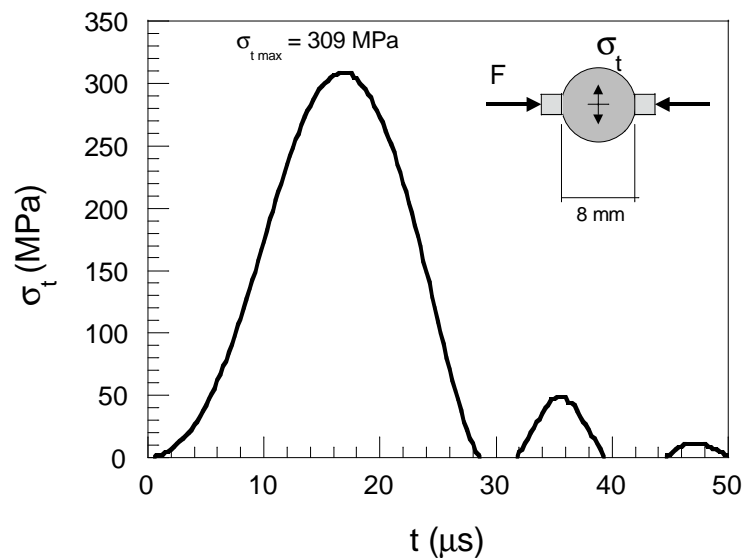
BRAZR06C



BRAZR06D

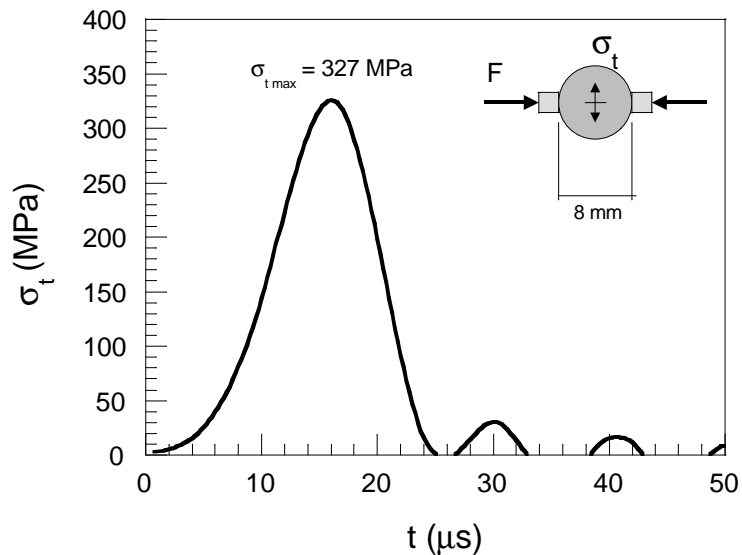


| Código de Ensayo: BRAZR07 | |
|---|----------------------------------|
| Material: Alúmina con zirconia. | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 366 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3877 kg/m³ | Diámetro: 12 mm |
| Resistencia a tracción: Sin datos | Longitud: 6 mm |
| Módulo de rotura: Sin datos. | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 22 de Febrero de 1999. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 1200 , 1 V/div. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. Presión de aire para el disparo: 2 bar. Temperatura: 24°C. | |
| Fotografías: | |
| No se obtuvieron fotografías.. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 34.9 kN. |
| Resistencia a tracción: | 309 MPa. |
| Velocidad de carga: | 29.7·10⁶ MPa/s |



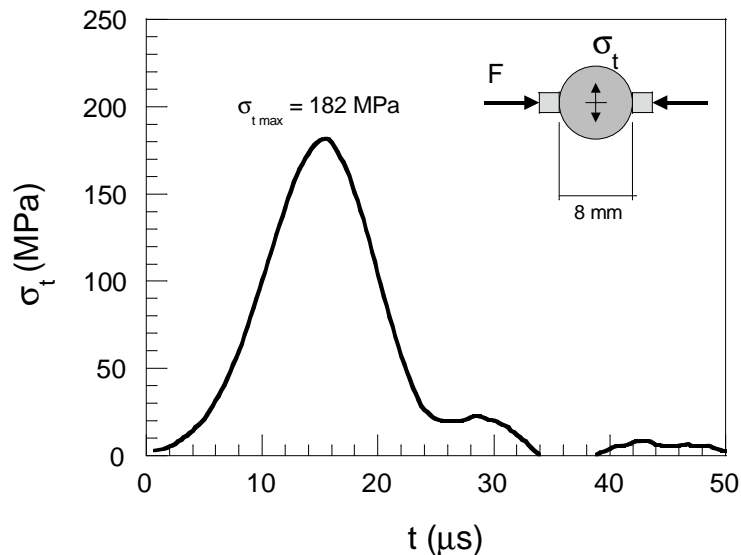
| | |
|---|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRSIC01 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m ³ | Diámetro: 7.99 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 307 MPa | Longitud: 4.02 mm |
| Módulo de rotura ¹ 462 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Diciembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2100 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| No se obtuvieron fotografías. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 16.5 kN. |
| Resistencia a tracción: | 327 MPa. |
| Velocidad de carga: | 38.2·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



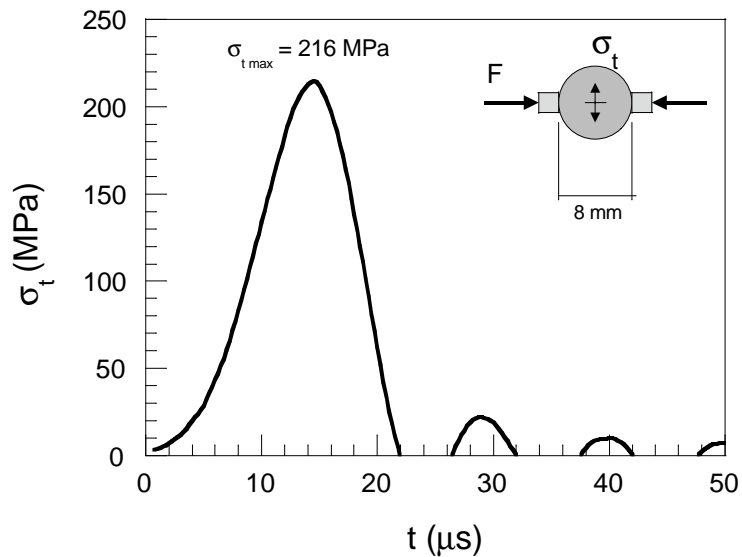
| Código de Ensayo: BRSIC02 | |
|---|----------------------------------|
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m ³ | Diámetro: 7.99 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 307 MPa | Longitud: 4.02 mm |
| Módulo de rotura ¹ 462 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Diciembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Intensidad del flash. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2100 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| No se obtuvieron fotografías. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 9.2 kN. |
| Resistencia a tracción: | 182 MPa. |
| Velocidad de carga: | 19.6·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



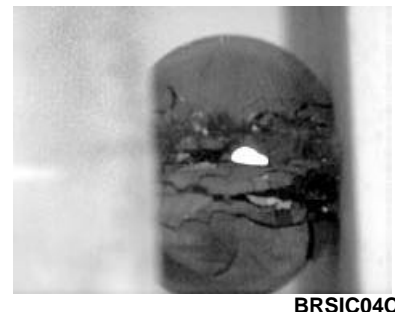
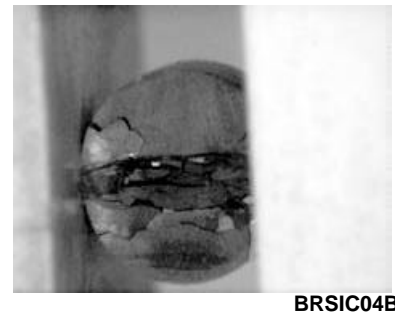
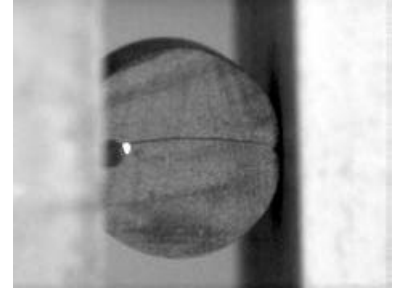
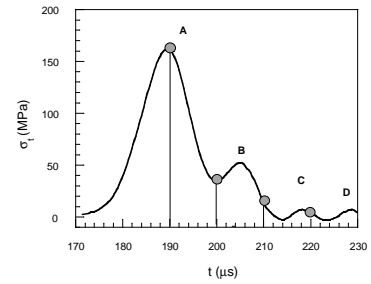
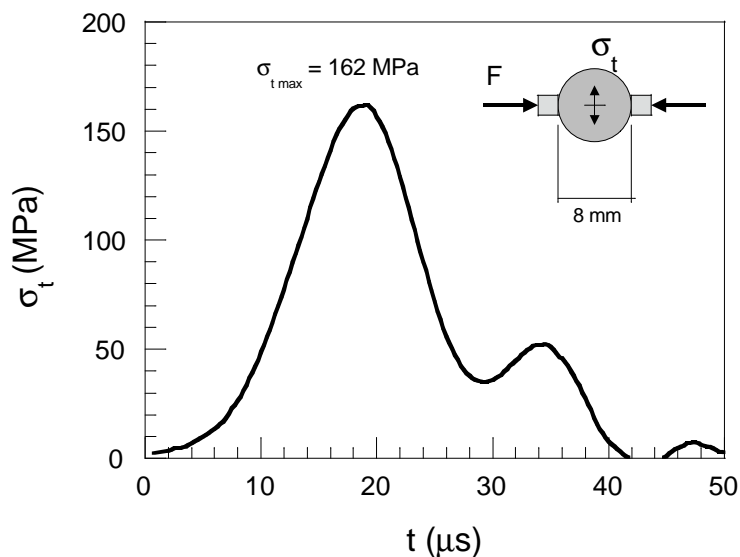
| | |
|---|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRSIC03 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m³ | Diámetro: 7.99 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 307 MPa | Longitud: 4.02 mm |
| Módulo de rotura ¹ 462 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Diciembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Intensidad del flash. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| No se obtuvieron fotografías. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 10.9 kN. |
| Resistencia a tracción: | 216 MPa. |
| Velocidad de carga: | 24.2·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



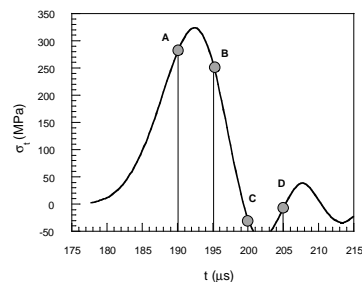
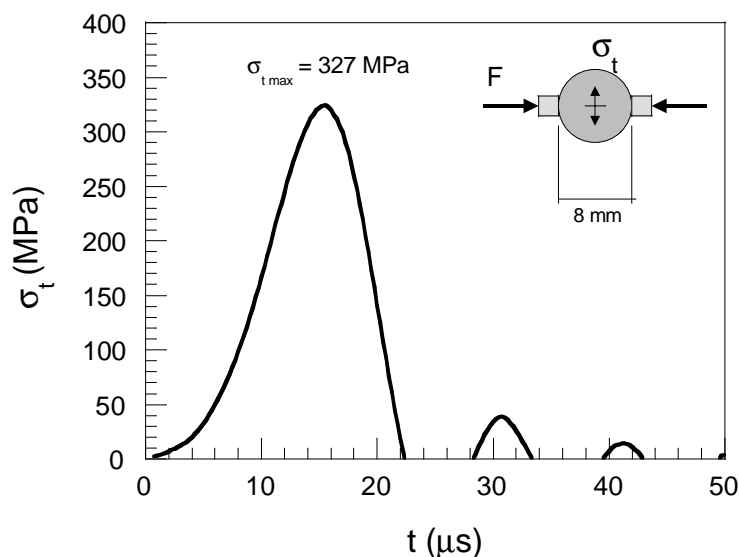
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRSIC04 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m³ | Diámetro: 7.99 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 307 MPa | Longitud: 4.02 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 462 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Diciembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Intensidad del flash. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 1.4 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRSIC04A.TIF: exposición 2μs, retraso de 190 μs . | |
| BRSIC04B.TIF: exposición 2μs, retraso de 200 μs . | |
| BRSIC04C.TIF: exposición 2μs, retraso de 210 μs . | |
| BRSIC04D.TIF: exposición 2μs, retraso de 220 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 8.2 kN. |
| Resistencia a tracción: | 162 MPa. |
| Velocidad de carga: | 15.3·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

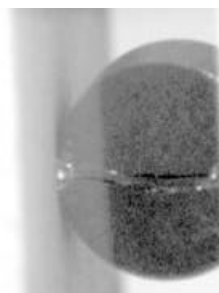


| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRSIC05 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 307 MPa | Longitud: 3.99 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 462 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Diciembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Intensidad del flash. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 1.4 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRSIC05A.TIF: exposición 2μs, retraso de 190 μs. | |
| BRSIC05B.TIF: exposición 2μs, retraso de 195 μs. | |
| BRSIC05C.TIF: exposición 2μs, retraso de 200 μs. | |
| BRSIC05D.TIF: exposición 2μs, retraso de 205 μs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 16.3 kN. |
| Resistencia a tracción: | 327 MPa. |
| Velocidad de carga: | 35.6·10⁶ MPa/s |

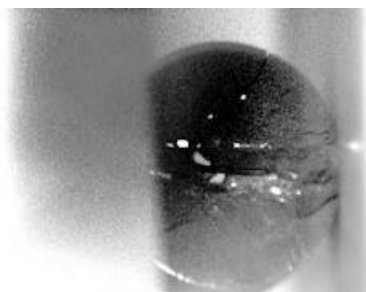
¹ Datos del fabricante



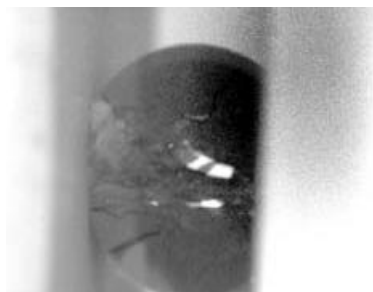
BRSIC05A



BRSIC05B



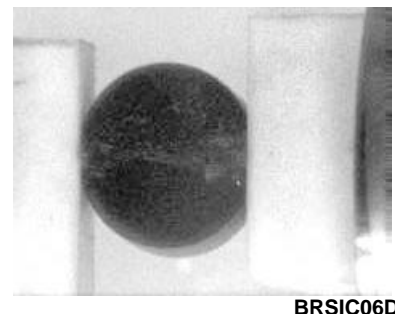
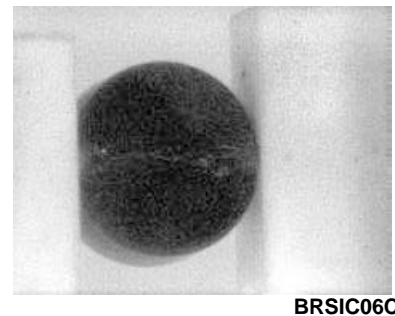
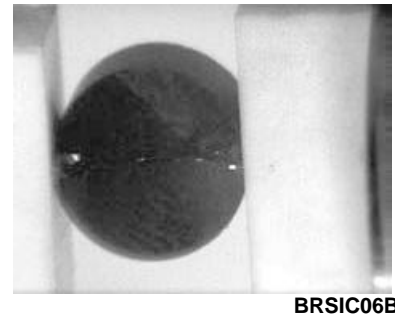
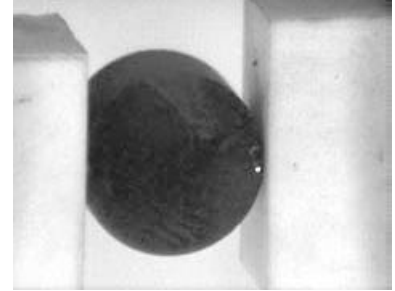
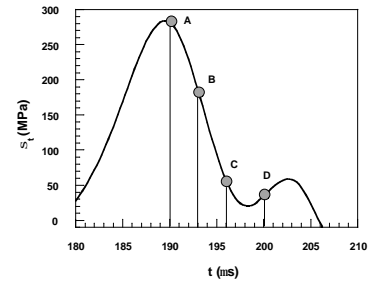
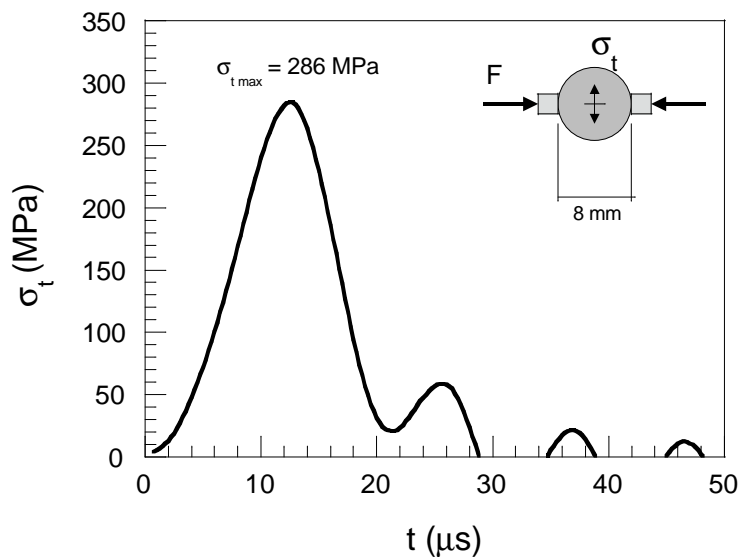
BRSIC05C



BRSIC05D

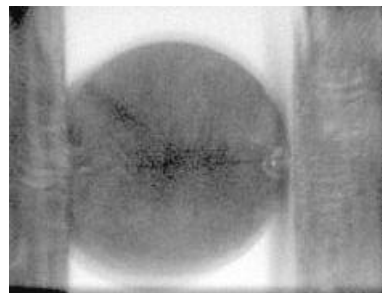
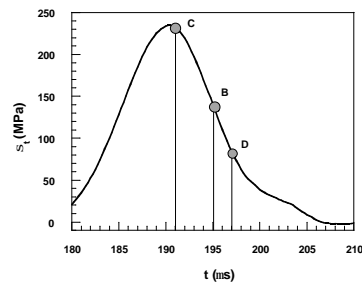
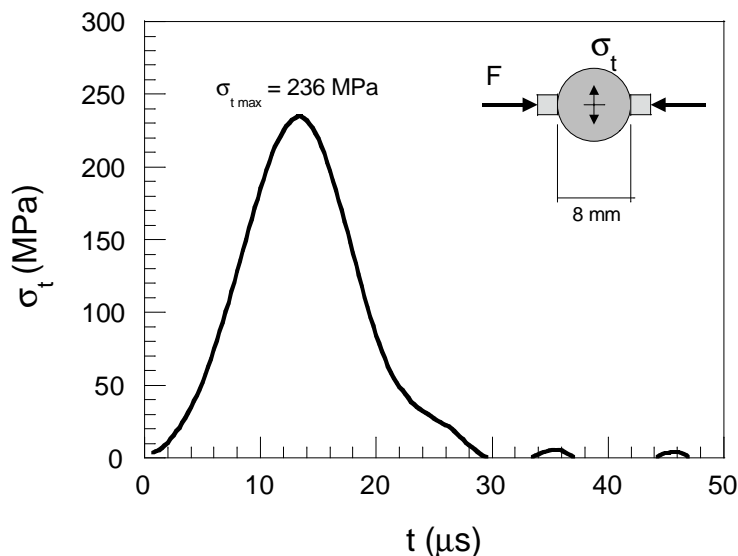
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRSIC06 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m³ | Diámetro: 7.98 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 307 MPa | Longitud: 4.01 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 462 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 7 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del Flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRSIC06A.TIF: exposición 1µs, retraso de 190 µs . | |
| BRSIC06B.TIF: exposición 1µs, retraso de 193 µs . | |
| BRSIC06C.TIF: exposición 1µs, retraso de 196 µs . | |
| BRSIC06D.TIF: exposición 1µs, retraso de 200 µs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 14.4 kN. |
| Resistencia a tracción: | 286 MPa. |
| Velocidad de carga: | 33.4·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

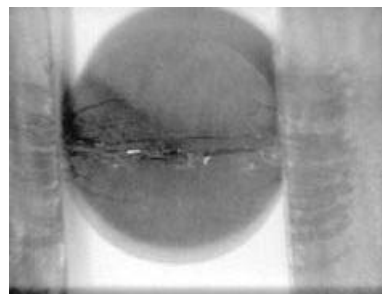


| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRSIC07 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m³ | Diámetro: 7.97 mm |
| Resistencia a tracción ¹ 307 MPa | Longitud: 4.01 mm |
| Módulo de rotura ¹ 462 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 3 de Junio de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del Flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRSIC07B.TIF: exposición 1μs, retraso de 195 μs. | |
| BRSIC07C.TIF: exposición 1μs, retraso de 191 μs. | |
| BRSIC07D.TIF: exposición 1μs, retraso de 197 μs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 11.9 kN. |
| Resistencia a tracción: | 236 MPa. |
| Velocidad de carga: | 27.3·10⁶ MPa/s |

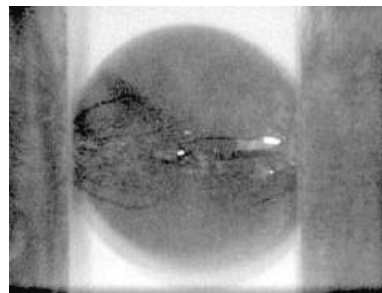
¹ Datos del fabricante



BRSIC07C



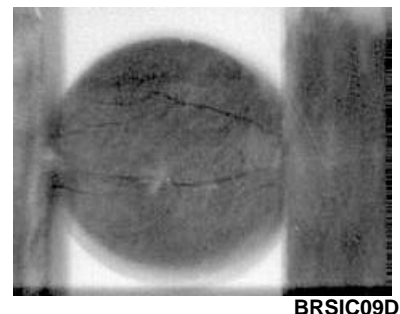
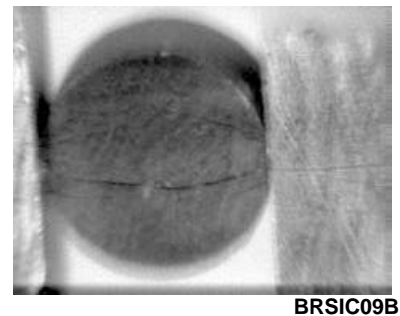
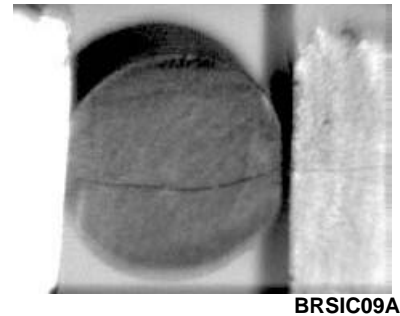
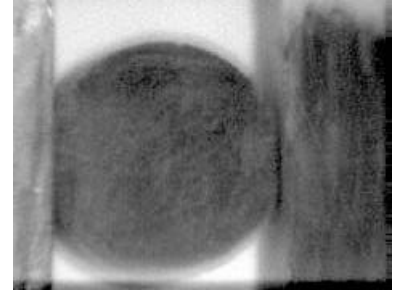
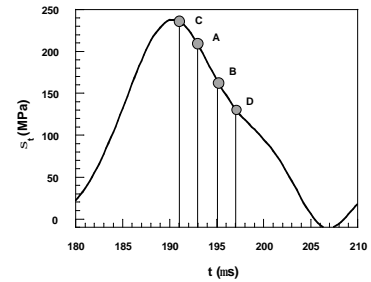
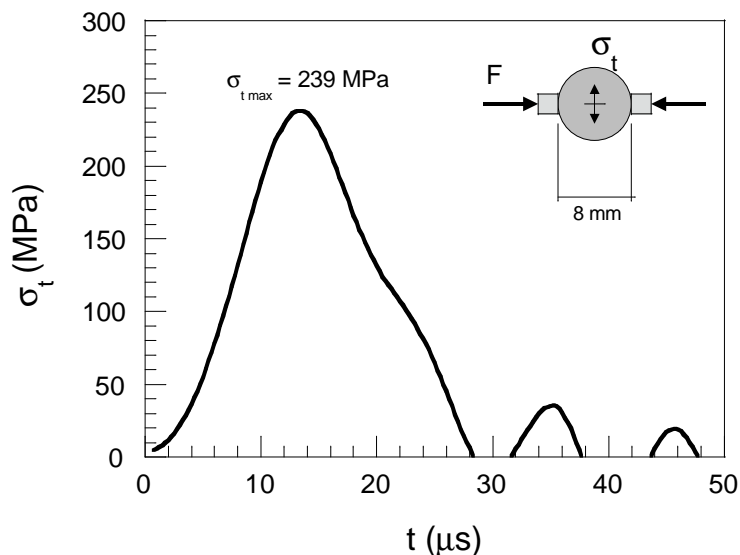
BRSIC07B



BRSIC07D

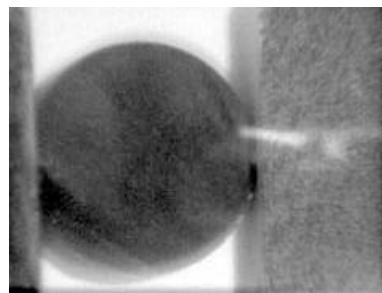
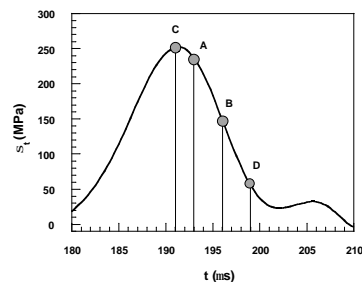
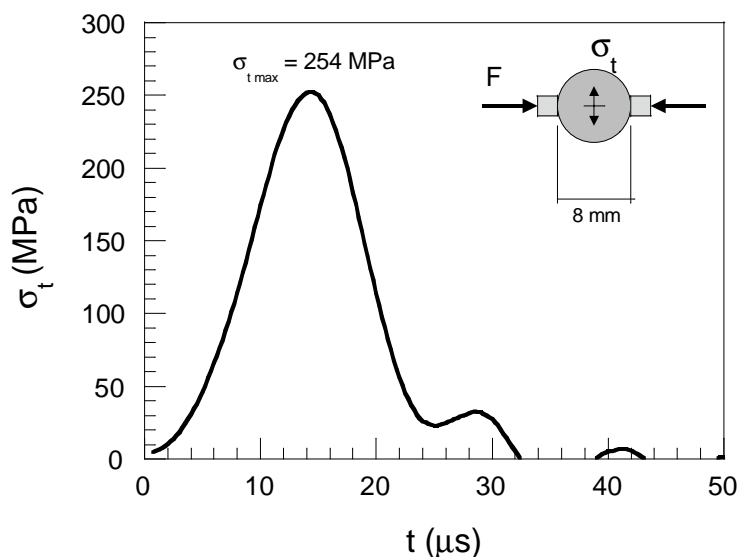
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRSIC09 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m³ | Diámetro: 8.00 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 307 MPa | Longitud: 4.01 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 462 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 3 de Junio de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del Flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRSIC09A.TIF: exposición 1µs, retraso de 193 µs . | |
| BRSIC09B.TIF: exposición 1µs, retraso de 195 µs . | |
| BRSIC09C.TIF: exposición 1µs, retraso de 191 µs . | |
| BRSIC09D.TIF: exposición 1µs, retraso de 197 µs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 12.0 kN. |
| Resistencia a tracción: | 239 MPa. |
| Velocidad de carga: | 27.3·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

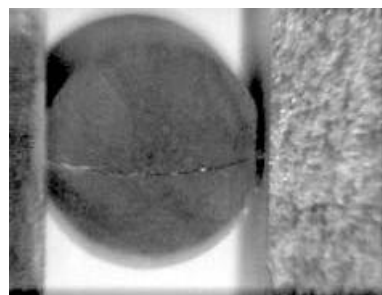


| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRSIC10 | |
| Material: SIC (Carburo de Silicio) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 420 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 3133 kg/m³ | Diámetro: 8.00 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : 307 MPa | Longitud: 4.03 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 462 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 3 de Junio de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del Flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRSIC10A.TIF: exposición 1μs, retraso de 193 μs . | |
| BRSIC10B.TIF: exposición 1μs, retraso de 196 μs . | |
| BRSIC10C.TIF: exposición 1μs, retraso de 191 μs . | |
| BRSIC10D.TIF: exposición 1μs, retraso de 199 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 12.9 kN. |
| Resistencia a tracción: | 254 MPa. |
| Velocidad de carga: | 27.9·10⁶ MPa/s |

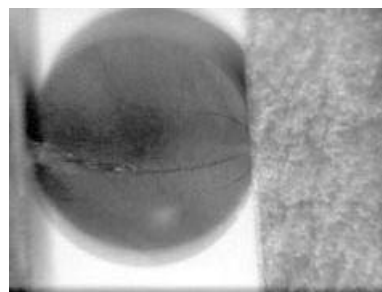
¹ Datos del fabricante



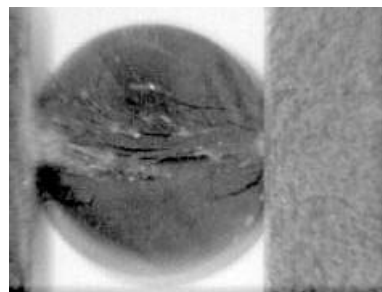
BRSIC10C



BRSIC10A



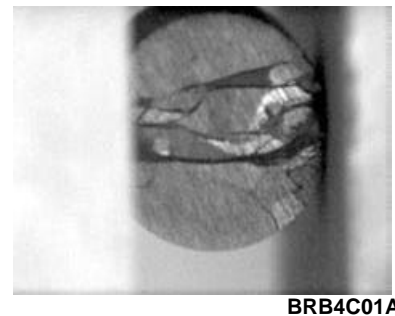
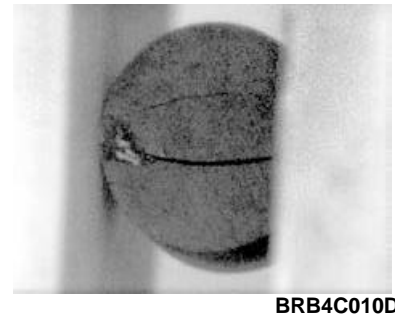
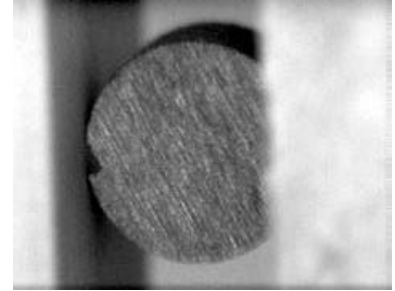
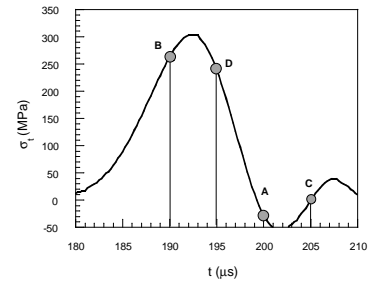
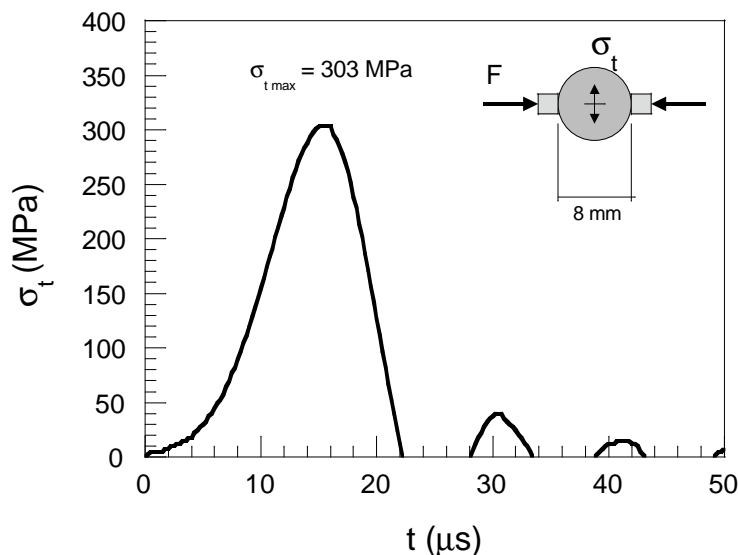
BRSIC10B



BRSIC10D

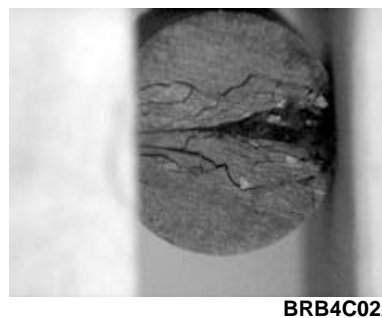
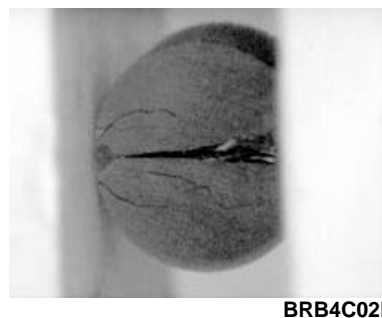
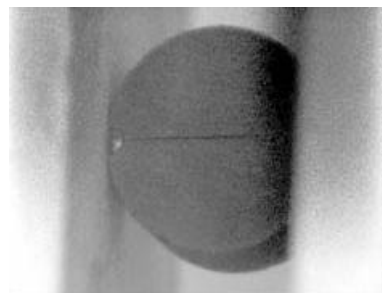
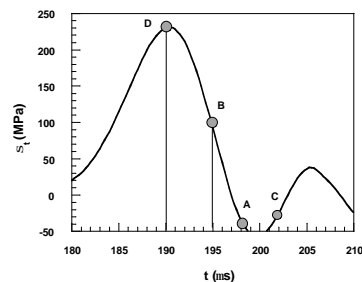
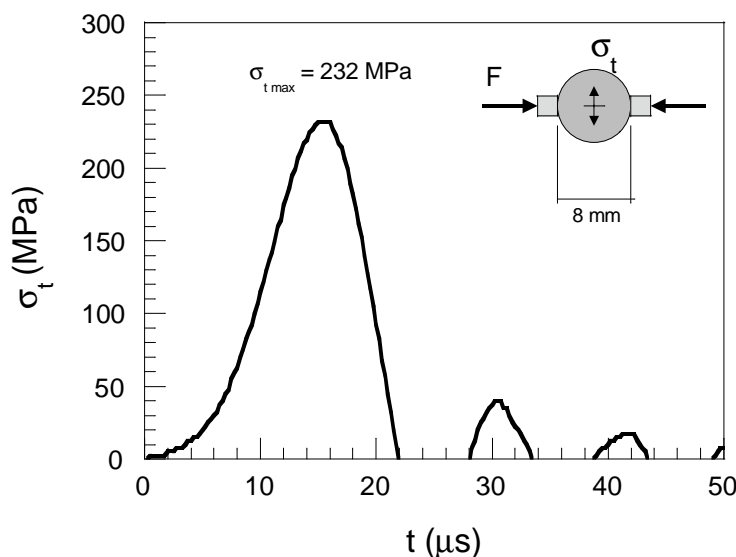
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRB4C01 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 461 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 2512 kg/m³ | Diámetro: 8.01 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 4.02 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 350 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Diciembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Iluminación del Flash. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 1.4 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRB4C01A.TIF: exposición 2μs, retraso de 200 μs. | |
| BRB4C01B.TIF: exposición 2μs, retraso de 190 μs. | |
| BRB4C01C.TIF: exposición 2μs, retraso de 205 μs. | |
| BRB4C01D.TIF: exposición 2μs, retraso de 195 μs. | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 15.3 kN. |
| Resistencia a tracción: | 303 MPa. |
| Velocidad de carga: | 34.0·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



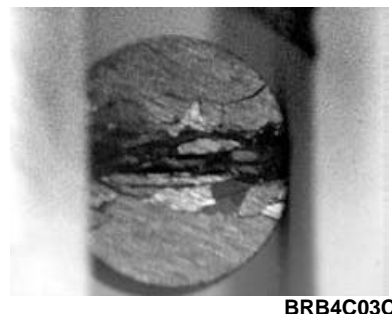
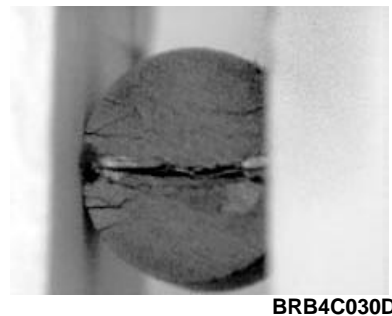
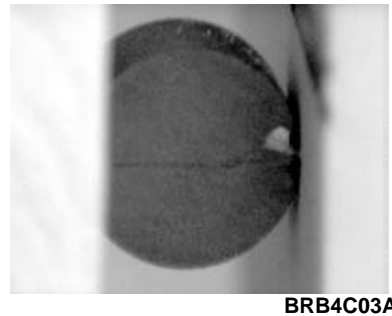
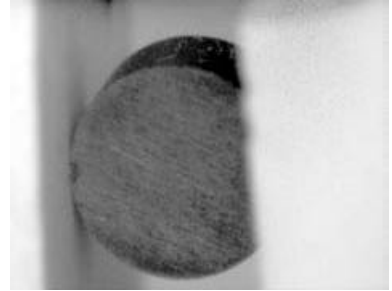
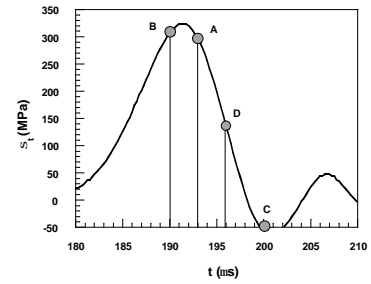
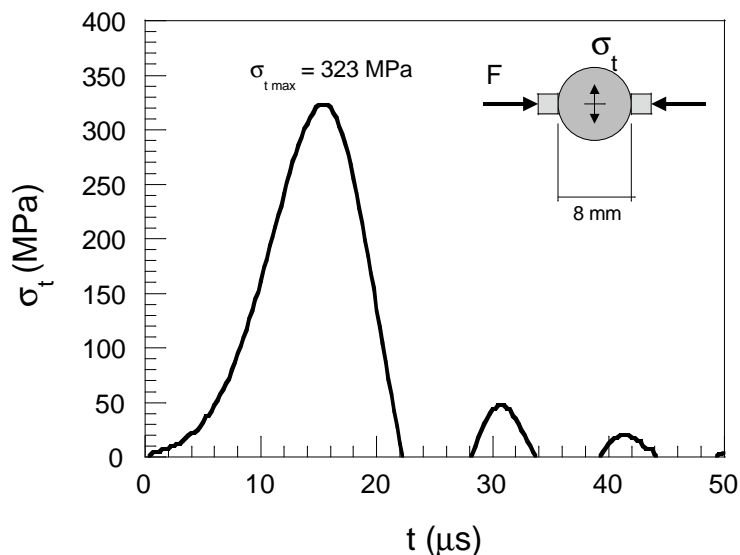
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRB4C02 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 461 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 2512 kg/m³ | Diámetro: 8.00 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 4.01 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 350 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Diciembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Iluminación del Flash. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 1.4 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRB4C02A.TIF: exposición 2μs, retraso de 198 μs . | |
| BRB4C02B.TIF: exposición 2μs, retraso de 195 μs . | |
| BRB4C02C.TIF: exposición 2μs, retraso de 202 μs . | |
| BRB4C02D.TIF: exposición 2μs, retraso de 190 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 11.7 kN. |
| Resistencia a tracción: | 232 MPa. |
| Velocidad de carga: | 26.2·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



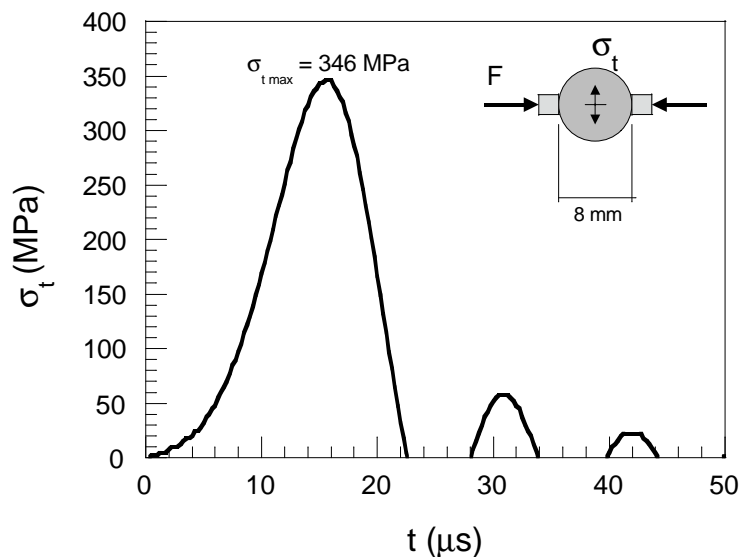
| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRB4C03 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 461 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 2512 kg/m³ | Diámetro: 8.01 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 4.02 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 350 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Diciembre de 1996. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Iluminación del Flash. | |
| Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. | |
| Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 1.4 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRB4C03A.TIF: exposición 1µs, retraso de 193 µs . | |
| BRB4C03B.TIF: exposición 1µs, retraso de 190 µs . | |
| BRB4C03C.TIF: exposición 2µs, retraso de 200 µs . | |
| BRB4C03D.TIF: exposición 2µs, retraso de 196 µs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 16.3 kN. |
| Resistencia a tracción: | 323 MPa. |
| Velocidad de carga: | 36.6·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



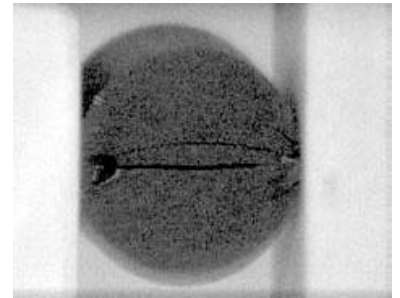
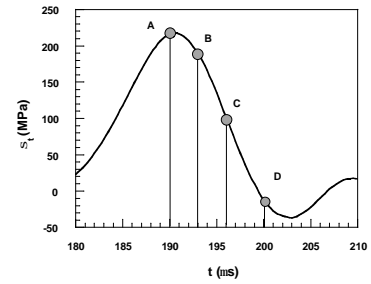
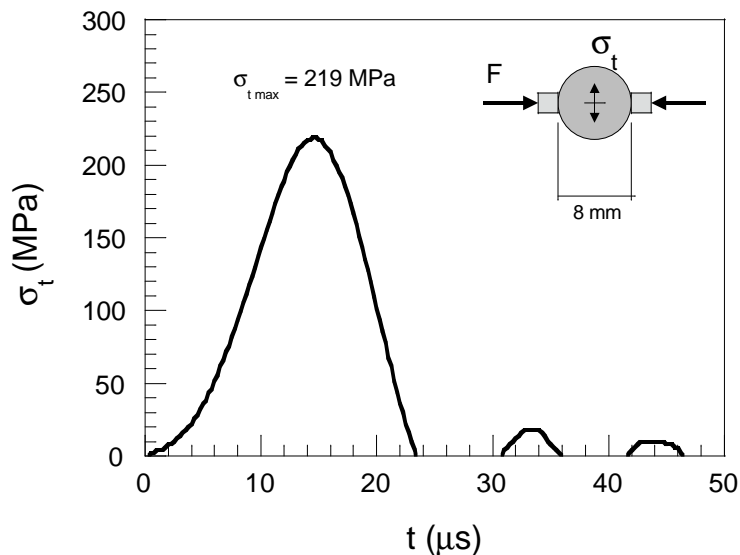
| | |
|--|--------------------------------|
| Código de Ensayo: BRB4C04 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 461 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 2512 kg/m³ | Diámetro: 8.02 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 4.01 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 350 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: Diciembre de 1996. | |
| Registro de datos: Canal1: Iluminación del Flash. Canal2: Barra incidente, x=500mm, ganancia 300 , 1 V/div. Canal3: Barra de salida, x=500mm, ganancia 2400 , 1 V/div. Canal4: Señal de disparo de las cámaras. | |
| Observaciones: Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 10 mm de espesor. | |
| Fotografías: No se obtuvieron fotografías. | |
| Resultados: Carga máxima: 17.5 kN. Resistencia a tracción: 346 MPa. Velocidad de carga: 38.6·10⁶ MPa/s | |

¹ Datos del fabricante

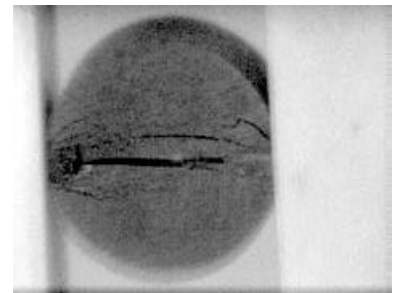


| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRB4C06 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 461 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 2512 kg/m³ | Diámetro: 8.01 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 4.01 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 350 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 28 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRB4C06A.TIF: exposición 1µs, retraso de 190 µs . | |
| BRB4C06B.TIF: exposición 1µs, retraso de 193 µs . | |
| BRB4C06C.TIF: exposición 1µs, retraso de 196 µs . | |
| BRB4C06D.TIF: exposición 1µs, retraso de 200 µs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 11.1 kN. |
| Resistencia a tracción: | 219 MPa. |
| Velocidad de carga: | 23.7·10⁶ MPa/s |

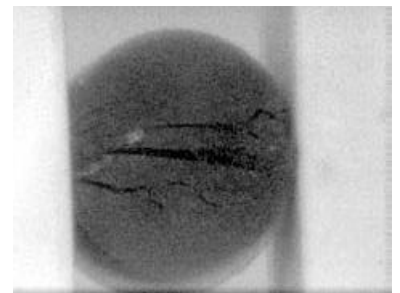
¹ Datos del fabricante



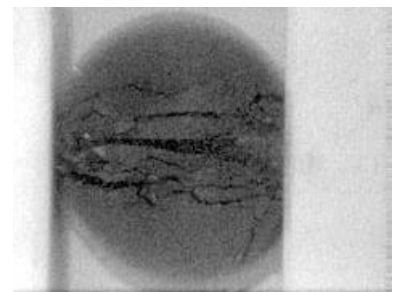
BRB4C06A



BRB4C06B



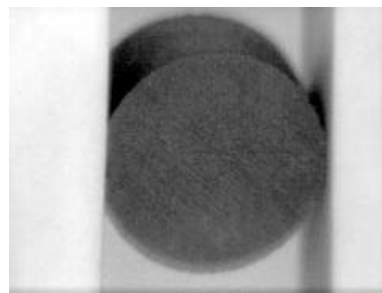
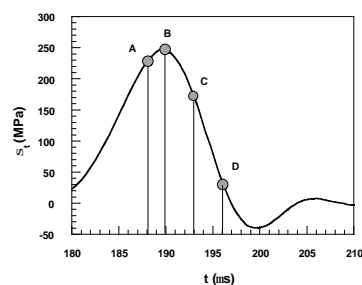
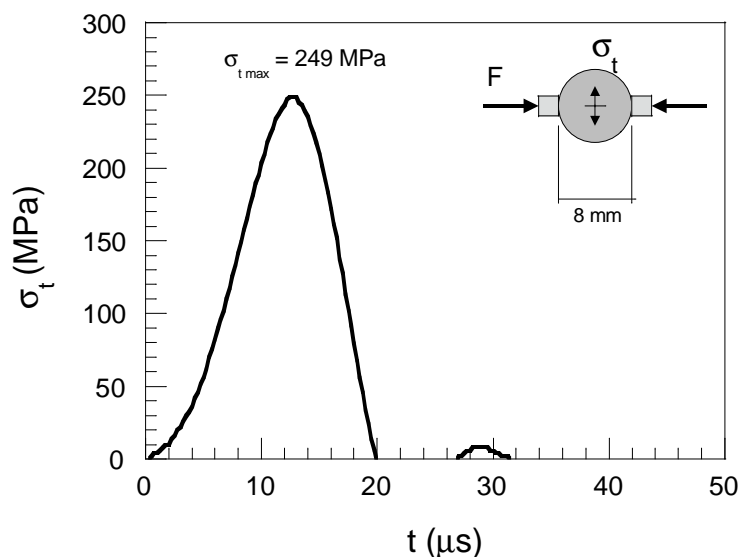
BRB4C06C



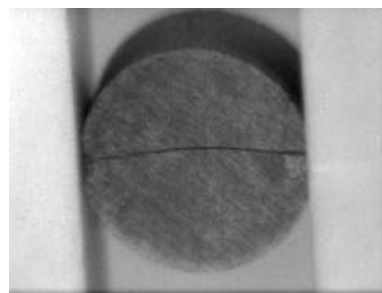
BRB4C06D

| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRB4C07 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 461 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 2512 kg/m³ | Diámetro: 8.00 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 4.01 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 350 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 28 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRB4C07A.TIF: exposición 1μs, retraso de 188 μs . | |
| BRB4C07B.TIF: exposición 1μs, retraso de 190 μs . | |
| BRB4C07C.TIF: exposición 1μs, retraso de 193 μs . | |
| BRB4C07D.TIF: exposición 1μs, retraso de 196 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 12.6 kN. |
| Resistencia a tracción: | 249 MPa. |
| Velocidad de carga: | 30.1·10⁶ MPa/s |

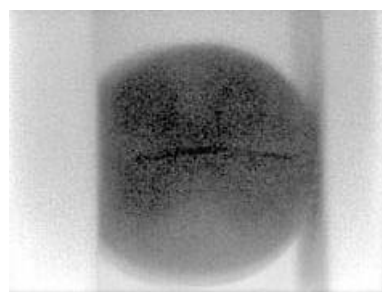
¹ Datos del fabricante



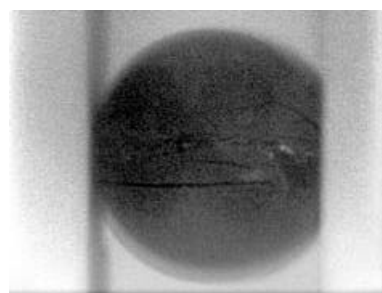
BRB4C07A



BRB4C07B



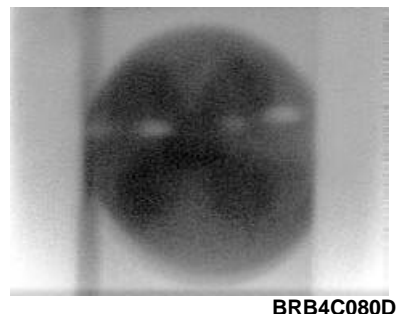
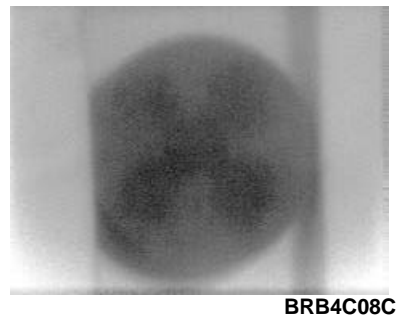
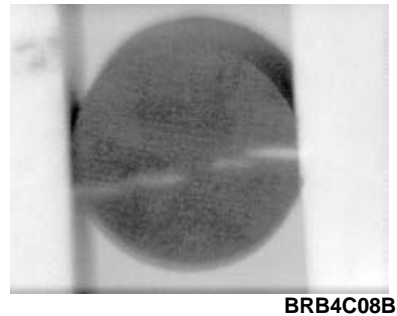
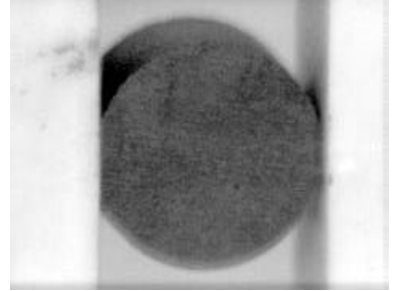
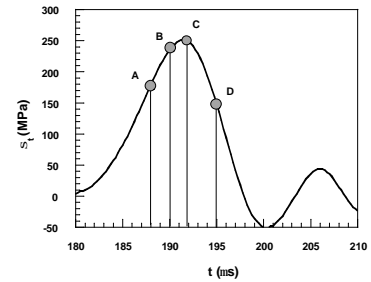
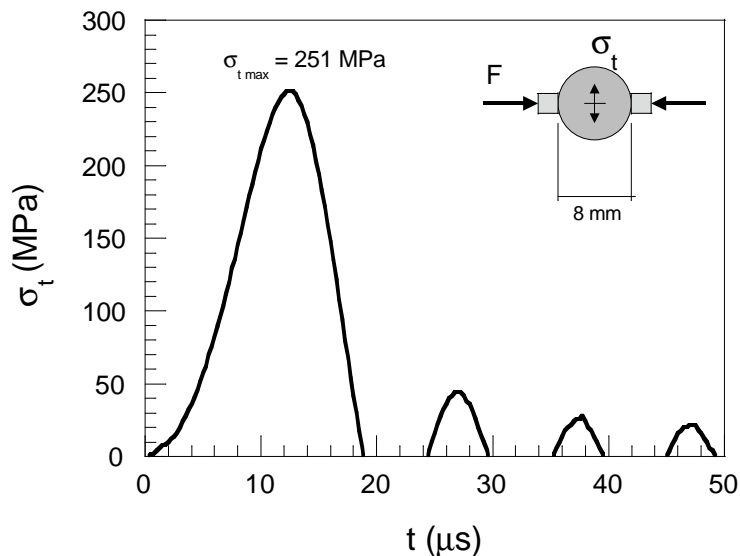
BRB4C07C



BRB4C07D

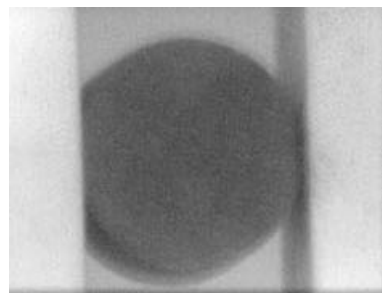
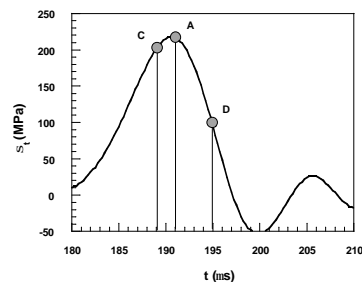
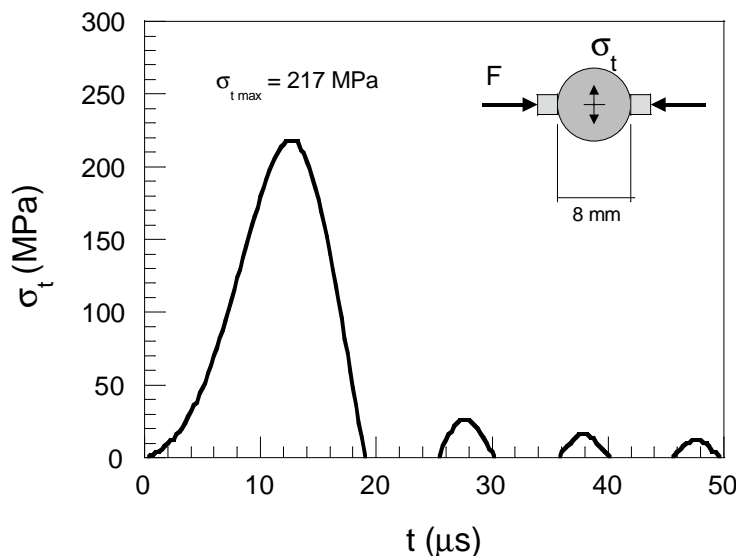
| Código de Ensayo: BRB4C08 | |
|--|----------------------------------|
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 461 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 2512 kg/m³ | Diámetro: 8.00 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 4.01 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 350 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 28 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRB4C08A.TIF: exposición 1µs, retraso de 188 µs . | |
| BRB4C08B.TIF: exposición 1µs, retraso de 190 µs . | |
| BRB4C08C.TIF: exposición 1µs, retraso de 192 µs . | |
| BRB4C08D.TIF: exposición 1µs, retraso de 195 µs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 12.7 kN. |
| Resistencia a tracción: | 251 MPa. |
| Velocidad de carga: | 32.5·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante

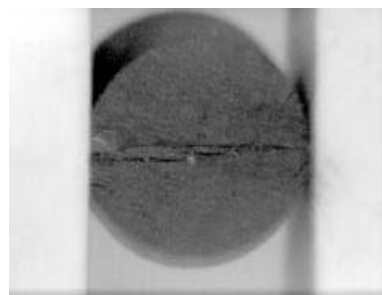


| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRB4C09 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 461 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 2512 kg/m³ | Diámetro: 8.00 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 4.01 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 350 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 29 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRB4C09A.TIF: exposición 1μs, retraso de 191 μs . | |
| BRB4C09C.TIF: exposición 1μs, retraso de 189 μs . | |
| BRB4C09D.TIF: exposición 1μs, retraso de 195 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 11.0 kN. |
| Resistencia a tracción: | 217 MPa. |
| Velocidad de carga: | 27.2·10⁶ MPa/s |

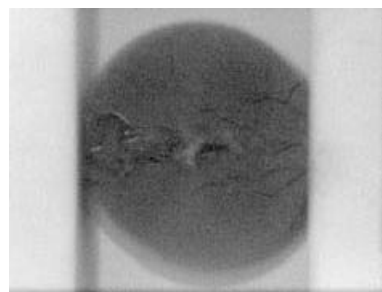
¹ Datos del fabricante



BRB4C09C



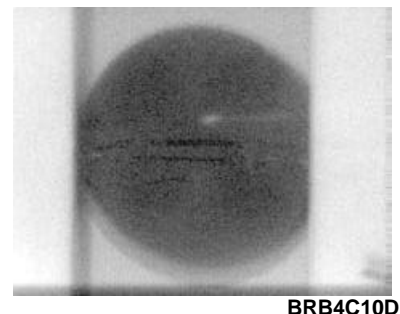
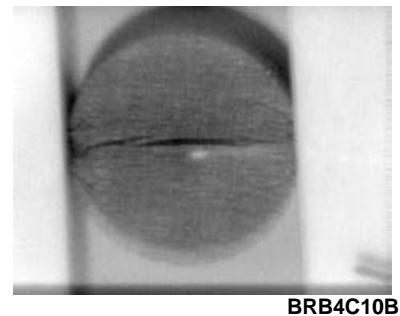
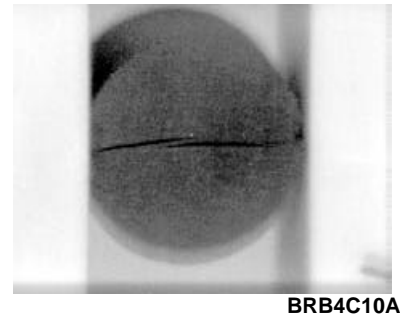
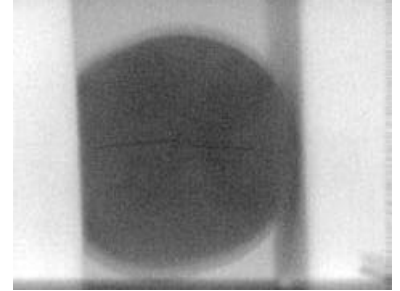
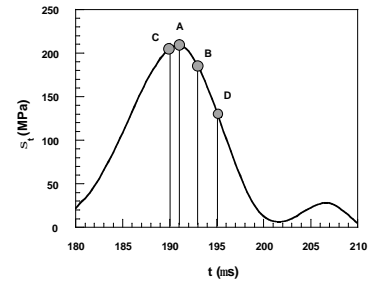
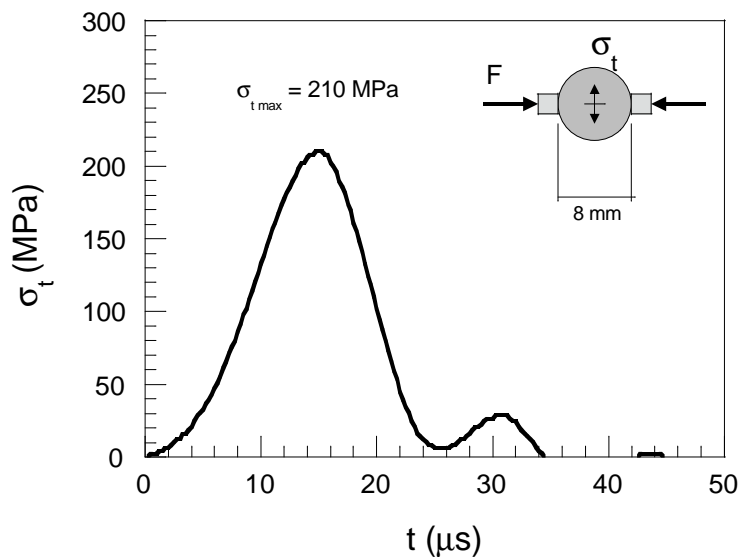
BRB4C09A



BRB4C090D

| | |
|--|----------------------------------|
| Código de Ensayo: BRB4C10 | |
| Material: B4C (Carburo de Boro) | |
| PROPIEDADES MECANICAS | PROPIEDADES GEOMETRICAS |
| Módulo de elasticidad: 461 GPa | Probeta cilíndrica. |
| Densidad: 2512 kg/m³ | Diámetro: 8.01 mm |
| Resistencia a tracción ¹ : Sin datos | Longitud: 3.92 mm |
| Módulo de rotura ¹ : 350 MPa | |
| Máquina de ensayos: Barra Hopkinson | |
| Fecha del Ensayo: 29 de Mayo de 1998. | |
| Registro de datos: | |
| Canal1: Barra incidente, x=500mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal2: Barra de salida, x=500mm, ganancia 3000 , 1 V/div. | |
| Canal3: Barra incidente, x=75 mm, ganancia 200 , 1 V/div. | |
| Canal4: Iluminación del flash. | |
| Observaciones: | |
| Se usaron discos de acero como protección de las barras de 22 mm de diámetro y 4 mm de espesor y apoyos de alúmina de 6 mm de espesor. | |
| Fotografías: | |
| Señal de disparo con la primera señal de la barra incidente, situada a x=75 mm del extremo de impacto con el proyectil y a 925mm del extremo en que se coloca la probeta. Trigger cuando la pendiente de subida de la señal alcanza los 2.5 V. Se usó un flip-flop tipo D para que solo hubiera un único disparo de las cámaras. | |
| BRB4C10A.TIF: exposición 1μs, retraso de 191 μs . | |
| BRB4C10B.TIF: exposición 1μs, retraso de 193 μs . | |
| BRB4C10C.TIF: exposición 1μs, retraso de 190 μs . | |
| BRB4C10D.TIF: exposición 1μs, retraso de 195 μs . | |
| Resultados: | |
| Carga máxima: | 10.4 kN. |
| Resistencia a tracción: | 210 MPa. |
| Velocidad de carga: | 22.4·10⁶ MPa/s |

¹ Datos del fabricante



Apéndice C.

ENSAYOS DINÁMICOS DE TRACCIÓN DIRECTA POR SPALLING

| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9401 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 94% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 303.6 GPa |
| Densidad: | 3661 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 193 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 352 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.01 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 26 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 24 de Enero de 1997 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 700 . Situada a 67.1 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9401A: Exposición 2 μ s, retraso 30 μ s. | |
| SPA9401C: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9401B: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPA9401D: Exposición 2 μ s, retraso 80 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 47 mm |
| Resistencia a tracción: | 275 MPa |
| Velocidad de deformación: | 743 s⁻¹ |



SPA9401A



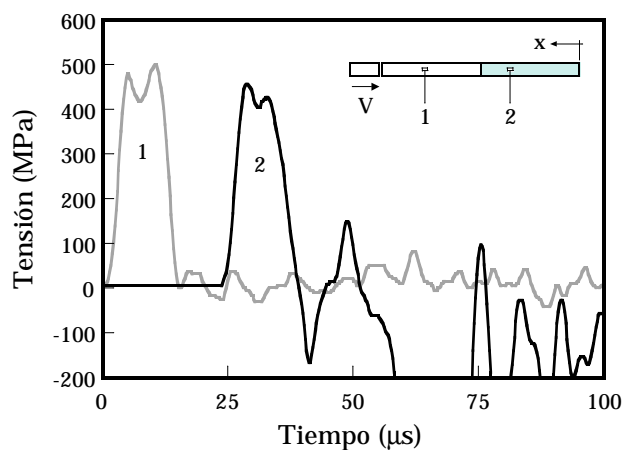
SPA9401C



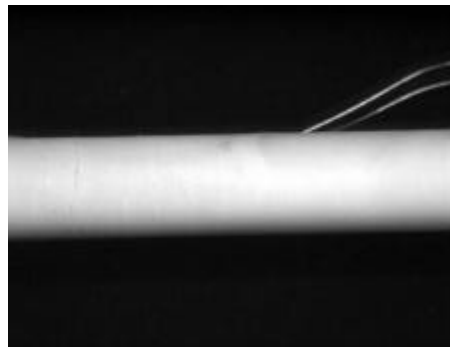
SPA9401B



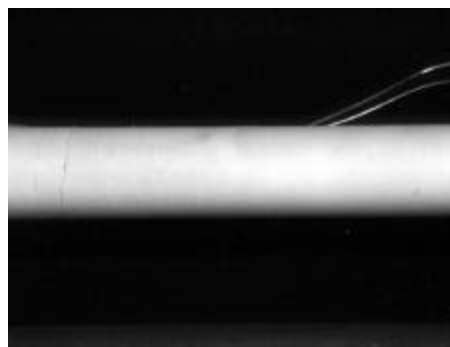
SPA9401D



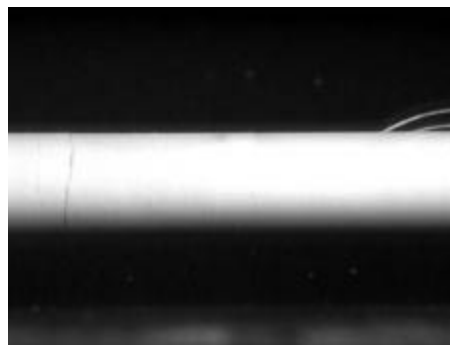
| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9402 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 94% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 303.0 GPa |
| Densidad: | 3656 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 193 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 352 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.01 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 24 de Enero de 1997 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 800 . Situada a 67.7 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPA9402A: Exposición 2 μ s, retraso 35 μ s. SPA9402C: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. SPA9402B: Exposición 2 μ s, retraso 45 μ s. SPA9402D: Exposición 2 μ s, retraso 80 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 44.5 mm |
| Resistencia a tracción: | 379 MPa |
| Velocidad de deformación: | 848 s⁻¹ |



SPA9402A



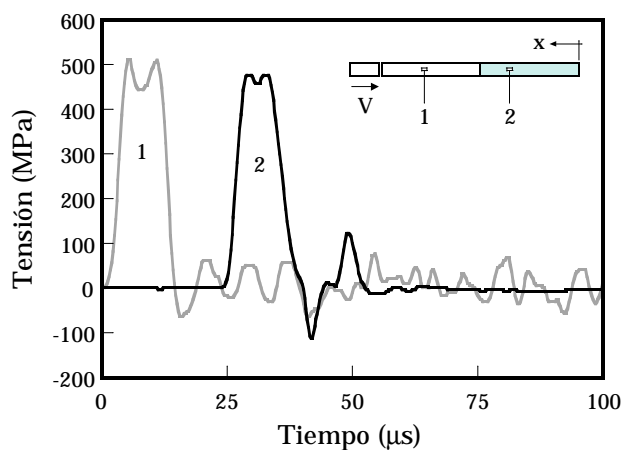
SPA9402C



SPA9402B



SPA9402D



| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9405 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 94% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 302.9 GPa |
| Densidad: | 3655 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 193 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 352 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.01 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 24 de Enero de 1997 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 820 . Situada a 67.6 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9405A: Exposición 2 μ s, retraso 35 μ s. | |
| SPA9405C: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9405B: Exposición 2 μ s, retraso 45 μ s. | |
| SPA9405D: Exposición 2 μ s, retraso 80 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 39 mm |
| Resistencia a tracción: | 278 MPa |
| Velocidad de deformación: | 828 s⁻¹ |



SPA9405A



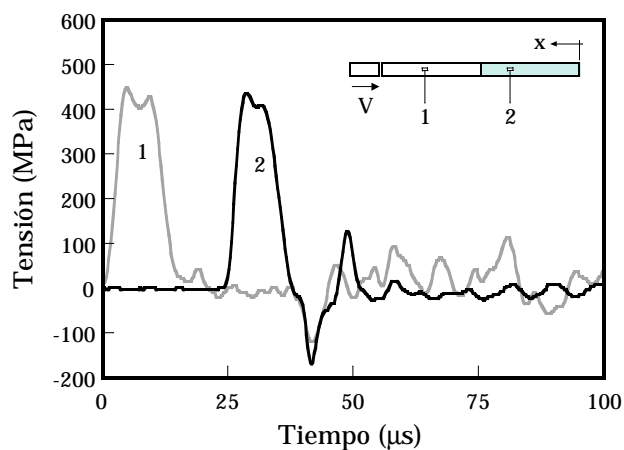
SPA9405C



SPA9405B



SPA9405D



| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9406 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 94% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 304.3 GPa |
| Densidad: | 3662 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 193 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 352 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.01 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 29 de Enero de 1997 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 800 . Situada a 67.2 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPA9406A: Exposición 2 μ s, retraso 35 μ s. SPA9406C: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. SPA9406B: Exposición 2 μ s, retraso 45 μ s. SPA9406D: Exposición 2 μ s, retraso 80 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 45 mm |
| Resistencia a tracción: | 375 MPa |
| Velocidad de deformación: | 713 s⁻¹ |



SPA9406A



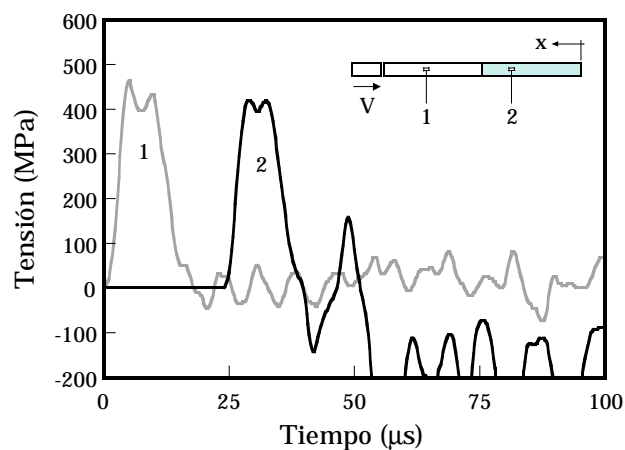
SPA9406C



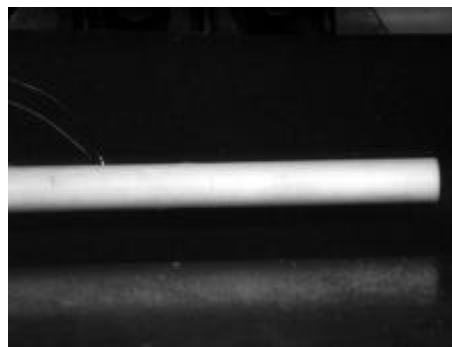
SPA9406B



SPA9406D



| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9407 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 94% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 303.8 GPa |
| Densidad: | 3662 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 193 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 352 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.01 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 29 de Enero de 1997 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 800 . Situada a 67.3 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPA9407A: Exposición 2 µs, retraso 40 µs. SPA9407B: Exposición 2 µs, retraso 50 µs. SPA9407C: Exposición 2 µs, retraso 60 µs. SPA9407D: Exposición 2 µs, retraso 80 µs. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 41.5 mm |
| Resistencia a tracción: | 386 MPa |
| Velocidad de deformación: | 891 s⁻¹ |



SPA9407A



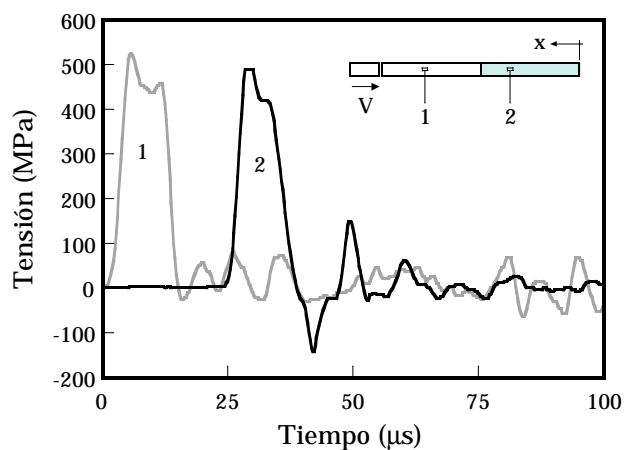
SPA9407B



SPA9407C



SPA9407D



| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9408 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 94% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 303.4 GPa |
| Densidad: | 3657 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 193 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 352 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.01 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 29 de Enero de 1997 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 800 . Situada a 67.4 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPA9408A: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. SPA9408B: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. SPA9408C: Exposición 2 μ s, retraso 60 μ s. SPA9408D: Exposición 2 μ s, retraso 80 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 41 mm |
| Resistencia a tracción: | 389 MPa |
| Velocidad de deformación: | 868 s⁻¹ |



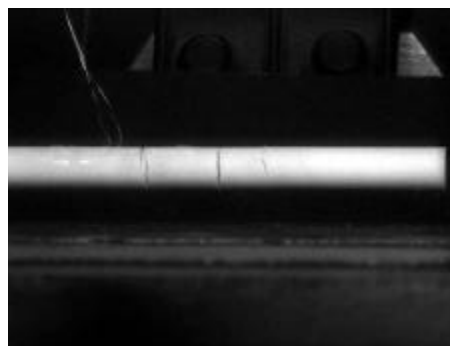
SPA9408A



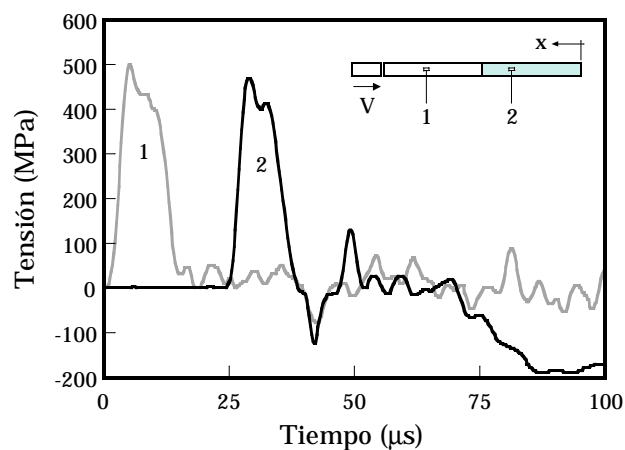
SPA9408B



SPA9408C



SPA9408D



| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9409 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 94% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 303.0 GPa |
| Densidad: | 3656 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 193 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 352 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.01 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 29 de Enero de 1997 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 800 . Situada a 67.8 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9409A: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9409B: Exposición 2 μ s, retraso 55 μ s. | |
| SPA9409C: Exposición 2 μ s, retraso 70 μ s. | |
| SPA9409D: Exposición 2 μ s, retraso 85 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 40 mm |
| Resistencia a tracción: | 402 MPa |
| Velocidad de deformación: | 993 s⁻¹ |



SPA9409A



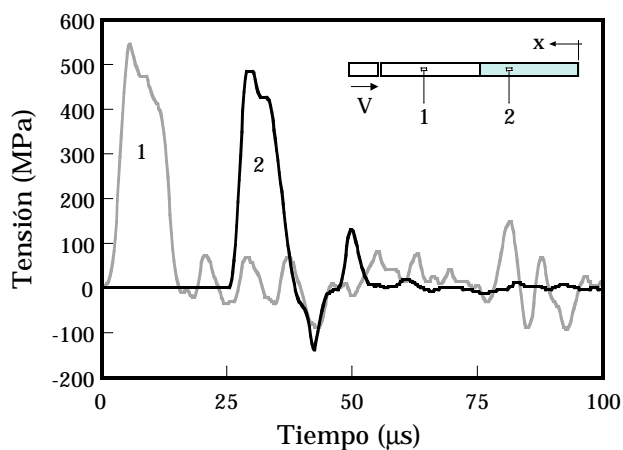
SPA9409B



SPA9409C



SPA9409D



| | |
|--|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9410 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 94% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 303.8 GPa |
| Densidad: | 3658 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 193 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 352 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.01 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 29 de Enero de 1997 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 800 . Situada a 67.4 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPA9410A: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. SPA9410B: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. SPA9410C: Exposición 2 μ s, retraso 70 μ s. SPA9410D: Exposición 2 μ s, retraso 100 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 42 mm |
| Resistencia a tracción: | 381 MPa |
| Velocidad de deformación: | 908 s⁻¹ |



SPA9410A



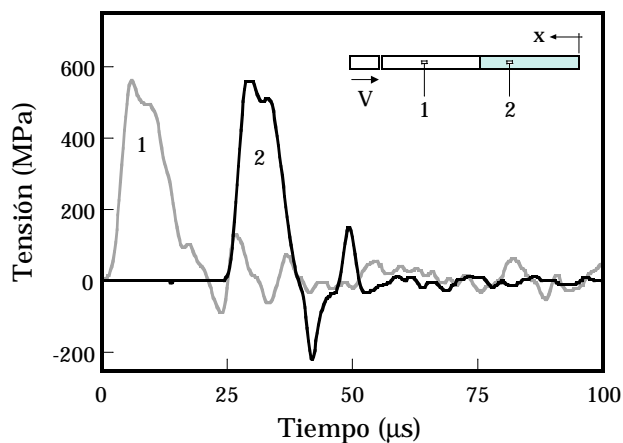
SPA9410B



SPA9410C



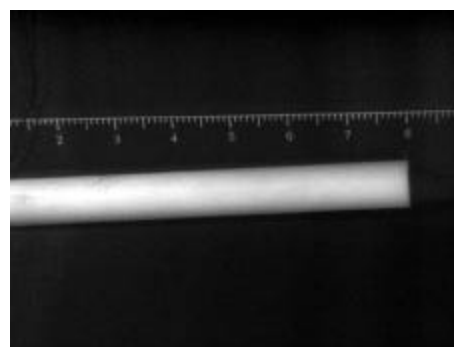
SPA9410D



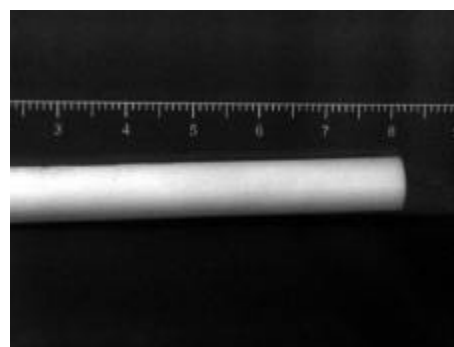
| | |
|--|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9802 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 98% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 366.6 GPa |
| Densidad: | 3878 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 320 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 1 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 2 V, ganancia 1800 . Situada a 69 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9802A: Exposición 2 μ s, retraso 30 μ s. | |
| SPA9802B: Exposición 2 μ s, retraso 45 μ s. | |
| SPA9802C: Exposición 2 μ s, retraso 60 μ s. | |
| SPA9802D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 22 mm |
| Resistencia a tracción: | 311 MPa |
| Velocidad de deformación: | $\approx 800 \text{ s}^{-1}$ |



SPA9802A



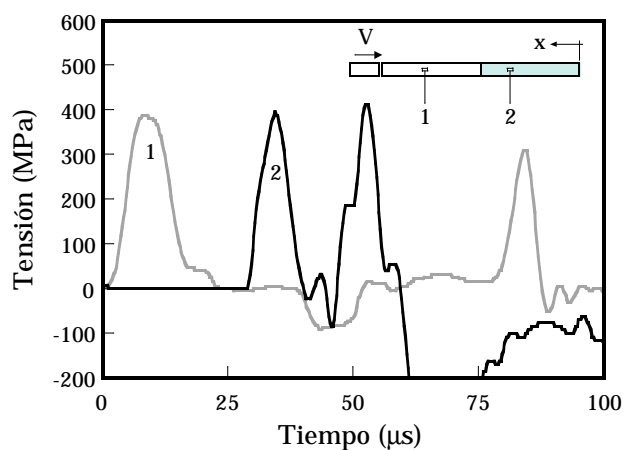
SPA9802B



SPA9802C



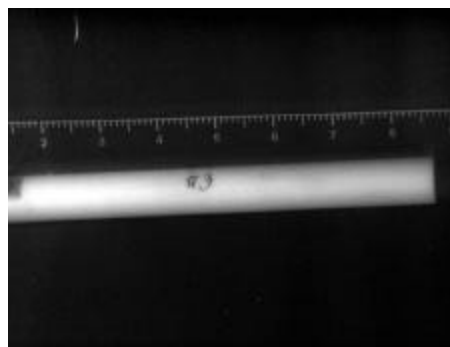
SPA9802D



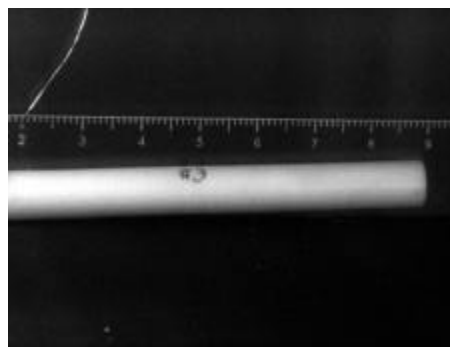
| | |
|--|-------------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9803 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 98% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 365.9 GPa |
| Densidad: | 3878 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 320 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 2 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 300 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 2 V, ganancia 2100 . Situada a 72 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPA9803A: Exposición 2 μ s, retraso 30 μ s. SPA9803B: Exposición 2 μ s, retraso 45 μ s. SPA9803C: Exposición 2 μ s, retraso 60 μ s. SPA9803D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 58 mm |
| Resistencia a tracción: | 390 MPa |
| Velocidad de deformación: | \approx 800 s⁻¹ |



SPA9803A



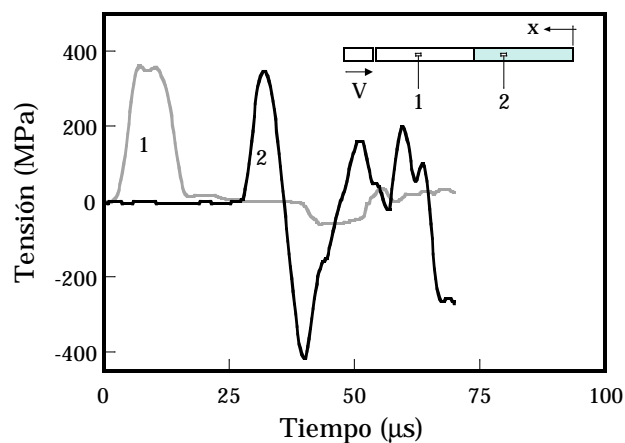
SPA9803B



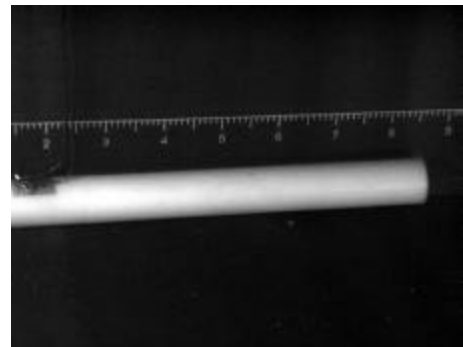
SPA9803C



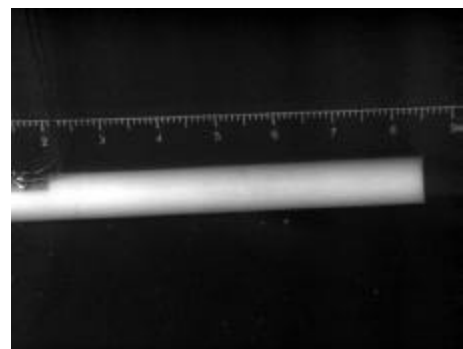
SPA9803D



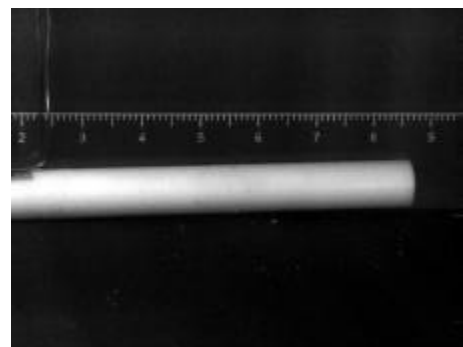
| | |
|---|-------------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9804 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 98% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 366.5 GPa |
| Densidad: | 3876 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 320 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 2 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 300 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 2 V, ganancia 2100 . Situada a 67.1 mm del extremo libre. No funcionó. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9804A: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9804B: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPA9804C: Exposición 2 μ s, retraso 70 μ s. | |
| SPA9804D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 34 mm |
| Resistencia a tracción: | 422 MPa |
| Velocidad de deformación: | \approx 800 s⁻¹ |



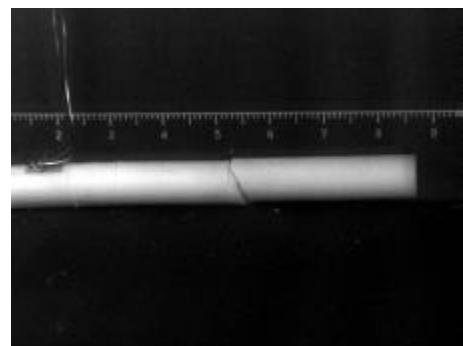
SPA9804A



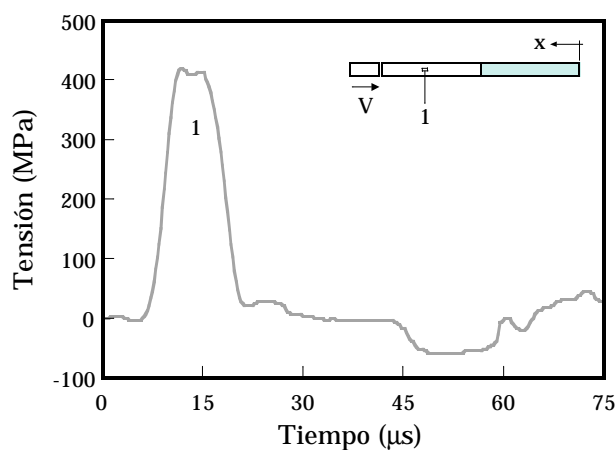
SPA9804B



SPA9804C



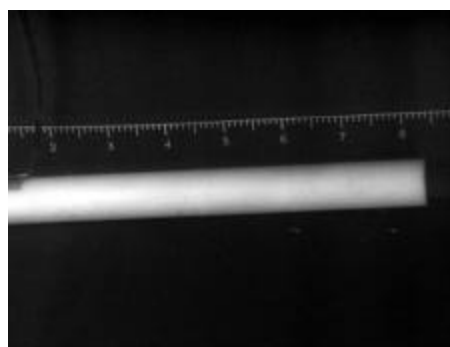
SPA9804D



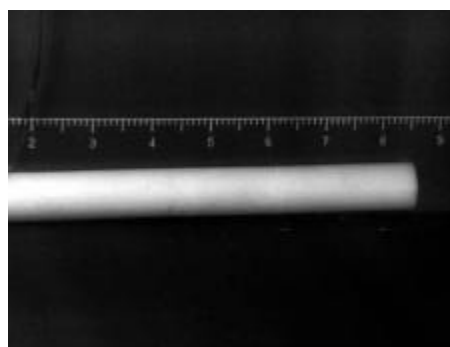
| | |
|--|-------------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9805 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 98% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 365.7 GPa |
| Densidad: | 3875 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 320 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 2 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 300 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 2100 . Situada a 72 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9805A: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPA9805B: Exposición 2 μ s, retraso 60 μ s. | |
| SPA9805C: Exposición 2 μ s, retraso 90 μ s. | |
| SPA9805D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 23 mm |
| Resistencia a tracción: | 315 MPa |
| Velocidad de deformación: | \approx 800 s⁻¹ |



SPA9805A



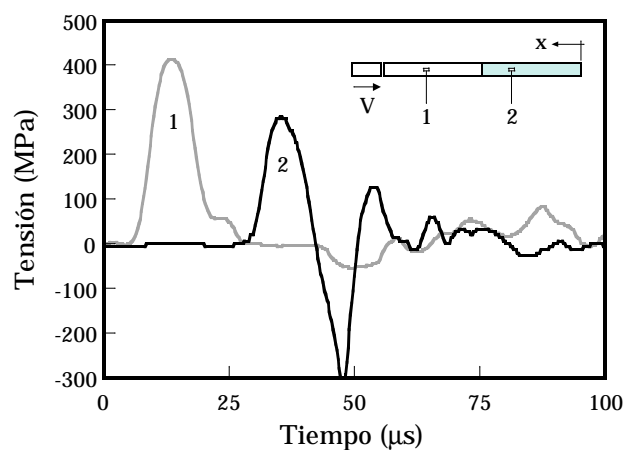
SPA9805B



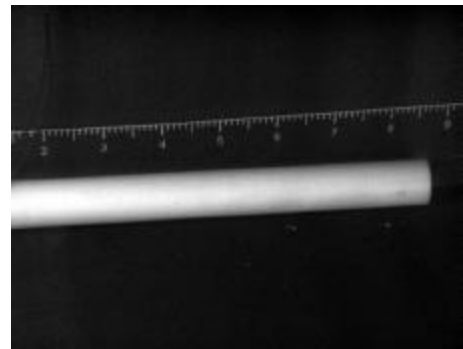
SPA9805C



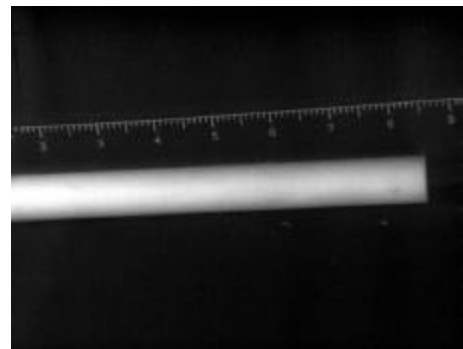
SPA9805D



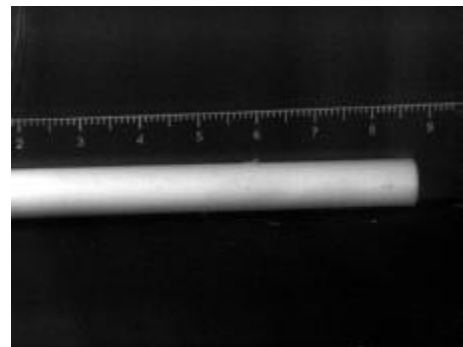
| | |
|--|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9806 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 98% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 365.4 GPa |
| Densidad: | 3877 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 320 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectil 24 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 2 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 300 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 2 V, ganancia 2100 . Situada a 76.4 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9806A: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPA9806B: Exposición 2 μ s, retraso 60 μ s. | |
| SPA9806C: Exposición 2 μ s, retraso 90 μ s. | |
| SPA9806D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 27 mm |
| Resistencia a tracción: | 288 MPa |
| Velocidad de deformación: | $\approx 800 \text{ s}^{-1}$ |



SPA9806A



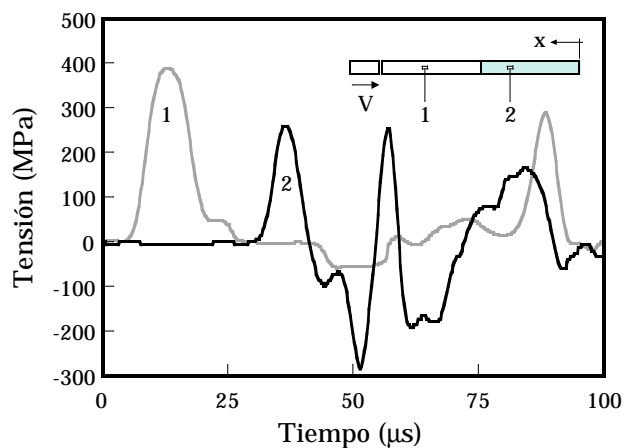
SPA9806B



SPA9806C



SPA9806D



| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9901 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 99.5% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 390.9 GPa |
| Densidad: | 3905 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 262 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 379 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.97 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 26 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 22 de Octubre de 1996 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 500 . Situada a 67 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9901A: Exposición 2 μ s, retraso 30 μ s. | |
| SPA9901B: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9901C: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPA9901D: Exposición 2 μ s, retraso 80 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 36 mm |
| Resistencia a tracción: | 279 MPa |
| Velocidad de deformación: | - s ⁻¹ |



SPA9901A



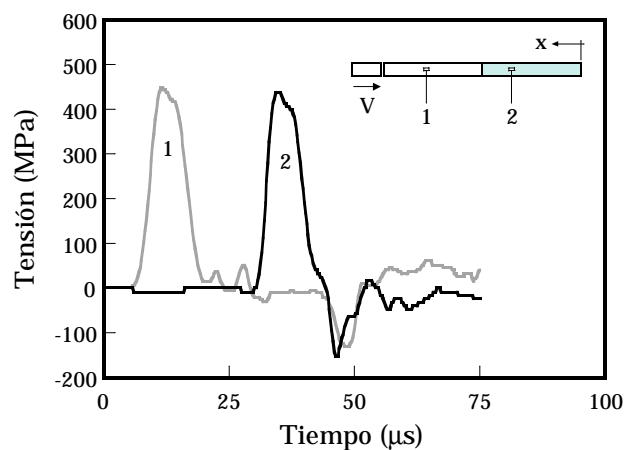
SPA9901B



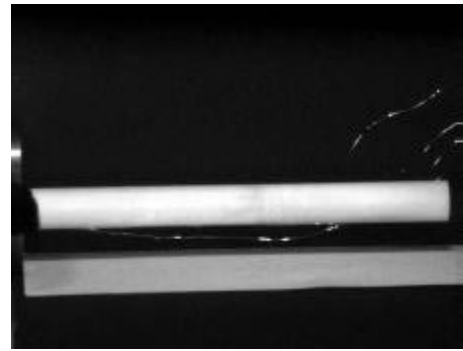
SPA9901C



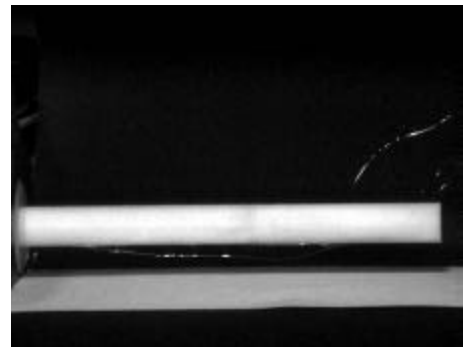
SPA9901D



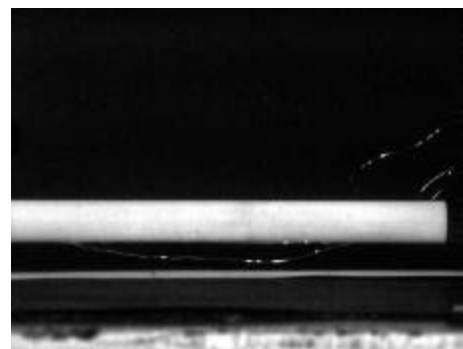
| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9902 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 99.5% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 390.9 GPa |
| Densidad: | 3905 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 262 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 379 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.97 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 26 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 24 de Octubre de 1996 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 700 . Situada a 79 mm del extremo libre. | |
| Canal 3: Banda mismas características. Situada a 61 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9902A: Exposición 2 μ s, retraso 30 μ s. | |
| SPA9902B: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9902C: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPA9902D: Exposición 2 μ s, retraso 80 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 35 mm |
| Resistencia a tracción: | 256 MPa |
| Velocidad de deformación: | 854 s⁻¹ |



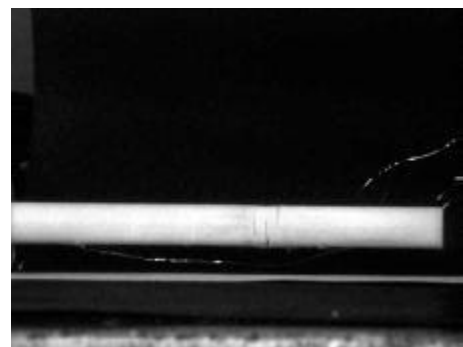
SPA9902A



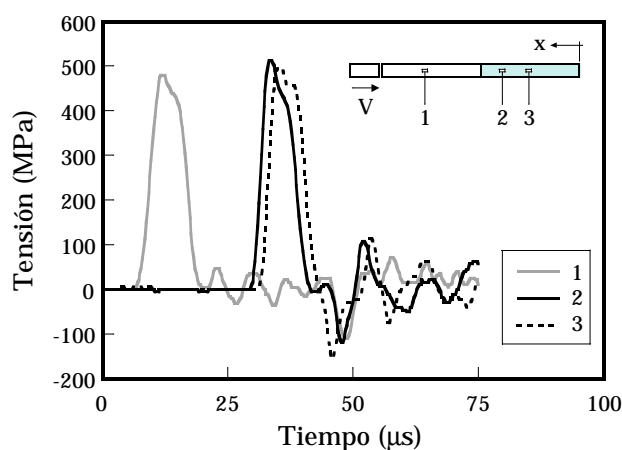
SPA9902B



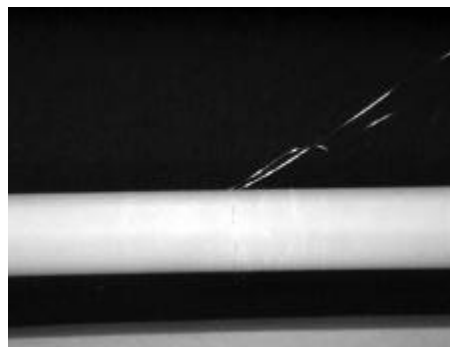
SPA9902C



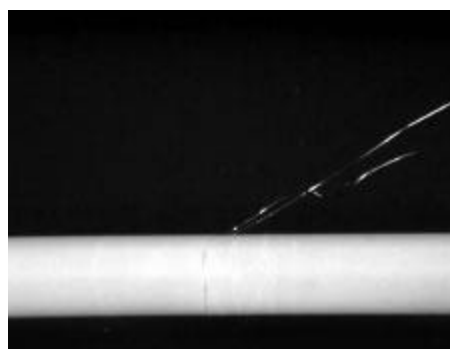
SPA9902D



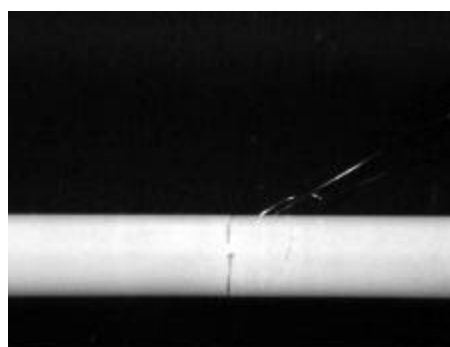
| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9903 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 99.5% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 390.3 GPa |
| Densidad: | 3899 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 262 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 379 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.97 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 26 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 24 de Octubre de 1996 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 700 . Situada a 74.5 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9903A: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9903B: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPA9903C: Exposición 2 μ s, retraso 60 μ s. | |
| SPA9903D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 35 mm |
| Resistencia a tracción: | 266 MPa |
| Velocidad de deformación: | 719 s⁻¹ |



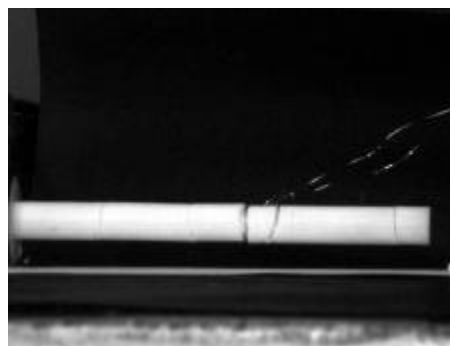
SPA9903A



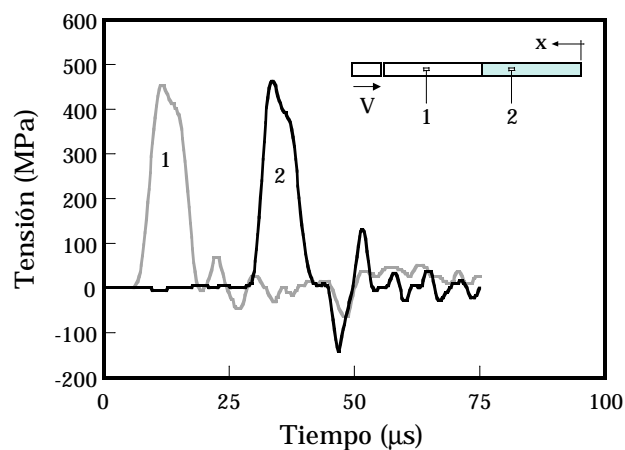
SPA9903B



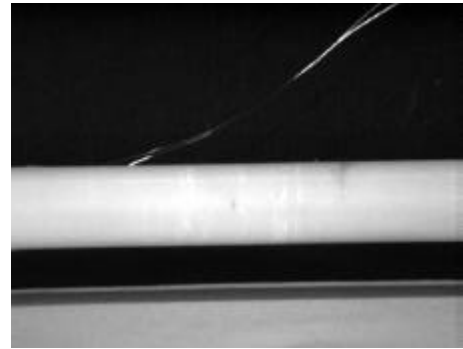
SPA9903C



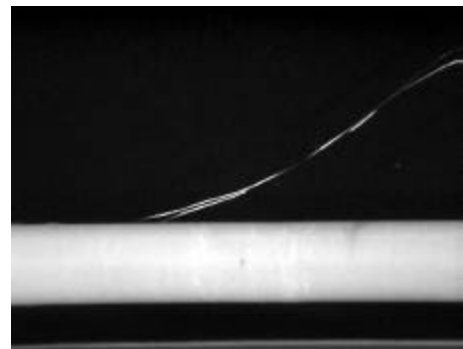
SPA9903D



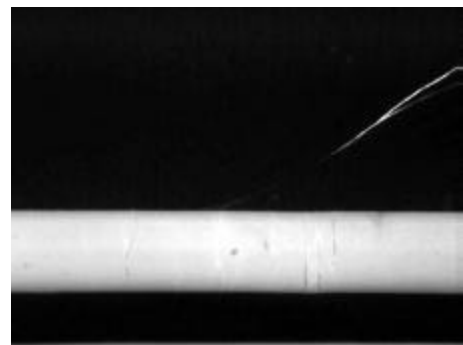
| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9905 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 99.5% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 394.1 GPa |
| Densidad: | 3924 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 262 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 379 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.97 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 26 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 29 de Octubre de 1996 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 700 . Situada a 67 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9905A: Exposición 2 μ s, retraso 30 μ s. | |
| SPA9905B: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9905C: Exposición 2 μ s, retraso 55 μ s. | |
| SPA9905D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 30 mm |
| Resistencia a tracción: | 250 MPa |
| Velocidad de deformación: | 910 s⁻¹ |



SPA9905A



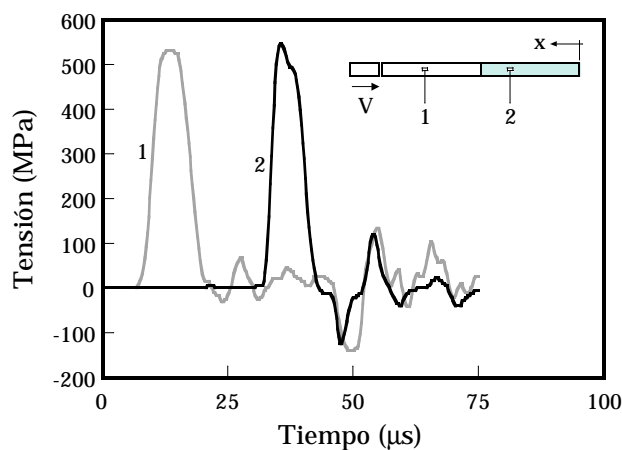
SPA9905B



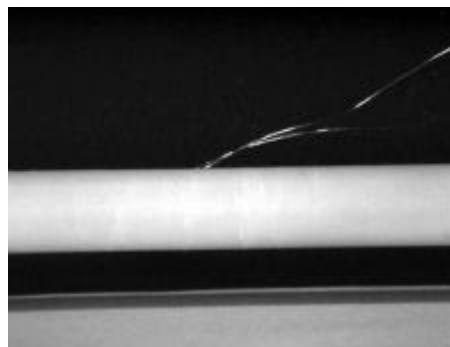
SPA9905C



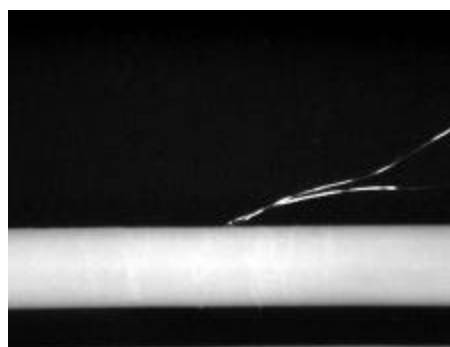
SPA9905D



| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9906 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 99.5% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 395.1 GPa |
| Densidad: | 3931 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 262 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 379 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.96 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 26 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 29 de Octubre de 1996 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 700 . Situada a 67.7 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9906A: Exposición 2 μ s, retraso 30 μ s. | |
| SPA9906B: Exposición 2 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9906C: Exposición 2 μ s, retraso 55 μ s. | |
| SPA9906D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 32 mm |
| Resistencia a tracción: | 228 MPa |
| Velocidad de deformación: | 583 s⁻¹ |



SPA9906A



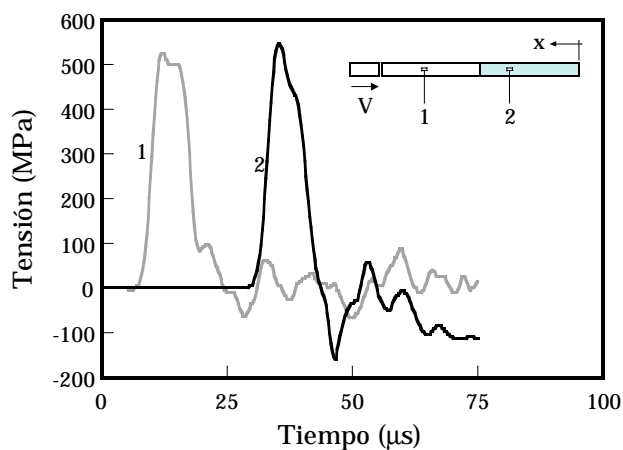
SPA9906B



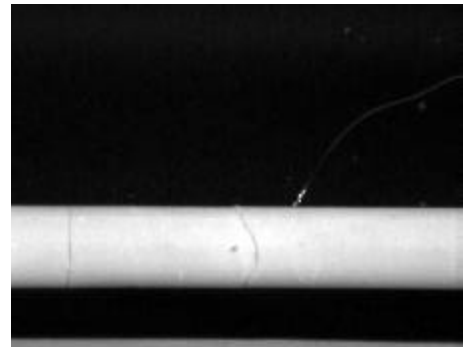
SPA9906C



SPA9906D



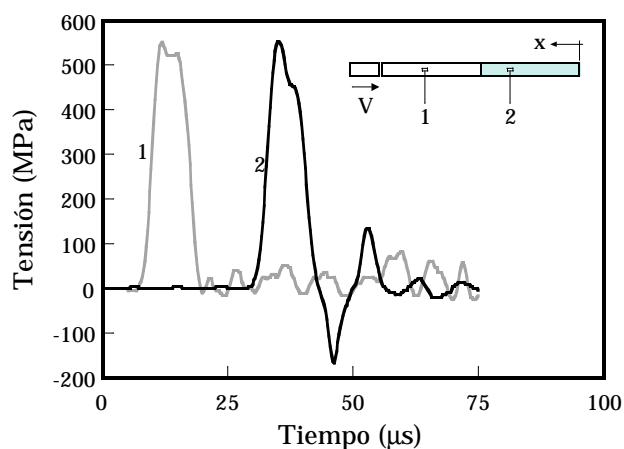
| | |
|---|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9908 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 99.5% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 393.3 GPa |
| Densidad: | 3916 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 262 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 379 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.97 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 26 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 29 de Octubre de 1996 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 200 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 7.5 V, ganancia 800 . Situada a 68 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9908C: Exposición 2 µs, retraso 55 µs. | |
| SPA9908D: Exposición 2 µs, retraso 200 µs. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 38 mm |
| Resistencia a tracción: | 350 MPa |
| Velocidad de deformación: | 816 s⁻¹ |



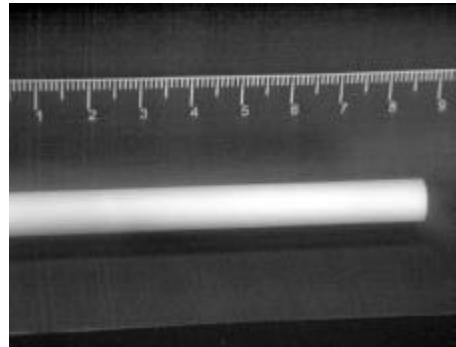
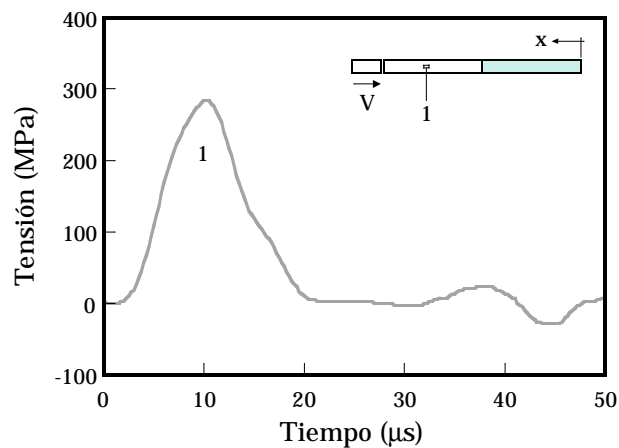
SPA9908C



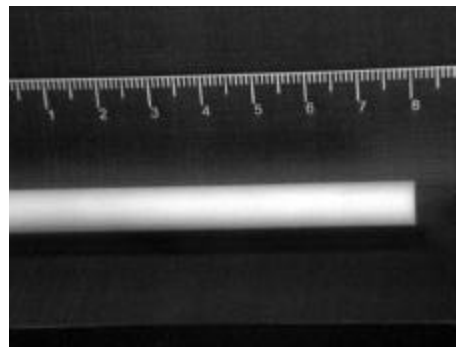
SPA9908D



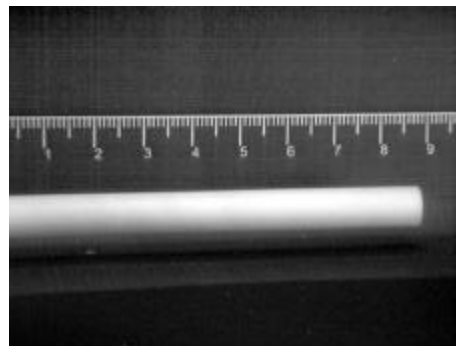
| | |
|--|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPA9909 | |
| MATERIAL: ALÚMINA DE 99.5% PUREZA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 395.2 GPa |
| Densidad: | 3932 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 262 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 379 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.97 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 20 mm modificado. | |
| FECHA DE ENSAYO: 4 de Agosto de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 400 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Probeta sin instrumentar. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPA9909A: Exposición 1 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPA9909B: Exposición 1 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPA9909C: Exposición 1 μ s, retraso 60 μ s. | |
| SPA9909D: Exposición 1 μ s, retraso 400 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 62 mm |
| Resistencia a tracción: | 268 MPa |
| Velocidad de deformación: | 192 s⁻¹ |



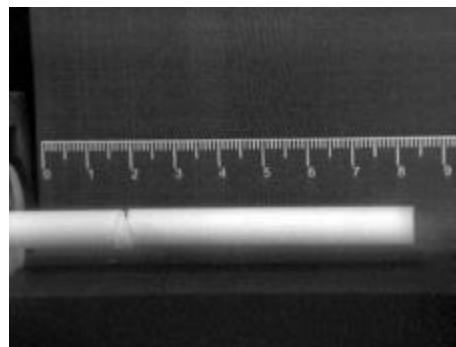
SPA9909A



SPA9909B



SPA9909C

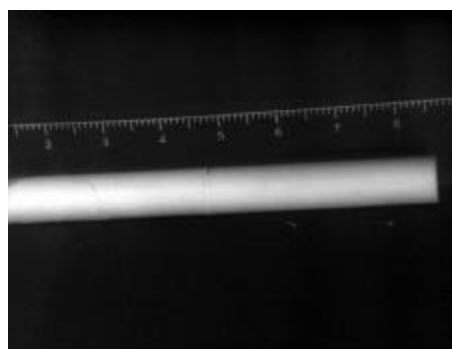


SPA9909D

| CÓDIGO DE ENSAYO: SPAZR01 | |
|--|-------------------------------------|
| MATERIAL: ALÚMINA CON ZIRCONIA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 346.0 GPa |
| Densidad: | 4031 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | - MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 22 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 2 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 300 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 2 V, ganancia 2100 . Situada a 76.1 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPAZR01A: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPAZR01B: Exposición 2 μ s, retraso 60 μ s. | |
| SPAZR01C: Exposición 2 μ s, retraso 90 μ s. | |
| SPAZR01D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 38 mm |
| Resistencia a tracción: | 360 MPa |
| Velocidad de deformación: | \approx 800 s⁻¹ |



SPAZR01A



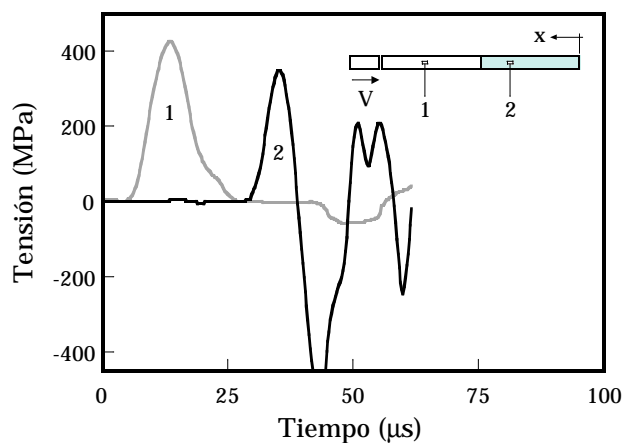
SPAZR01B



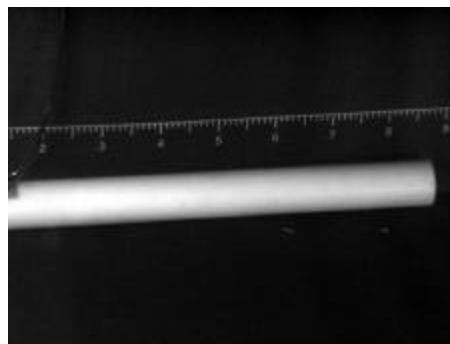
SPAZR01C



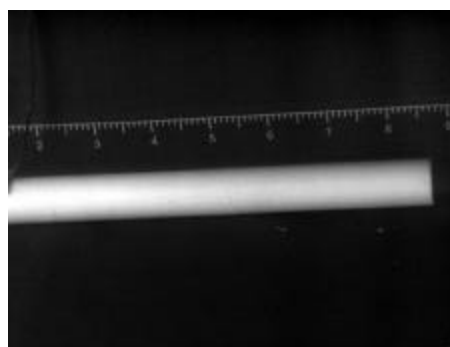
SPAZR01D



| CÓDIGO DE ENSAYO: SPAZR02 | |
|--|-----------------------------------|
| MATERIAL: ALÚMINA CON ZIRCONIA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 348.0 GPa |
| Densidad: | 4029 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | - MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 22 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 2 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 300 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 2 V, ganancia 2100 . Situada a 76.2 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPAZR02A: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. SPAZR02B: Exposición 2 μ s, retraso 55 μ s. SPAZR02C: Exposición 2 μ s, retraso 75 μ s. SPAZR02D: Exposición 2 μ s, retraso 200 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 34 mm |
| Resistencia a tracción: | 350 MPa |
| Velocidad de deformación: | $\approx 800\text{s}^{-1}$ |



SPAZR02A



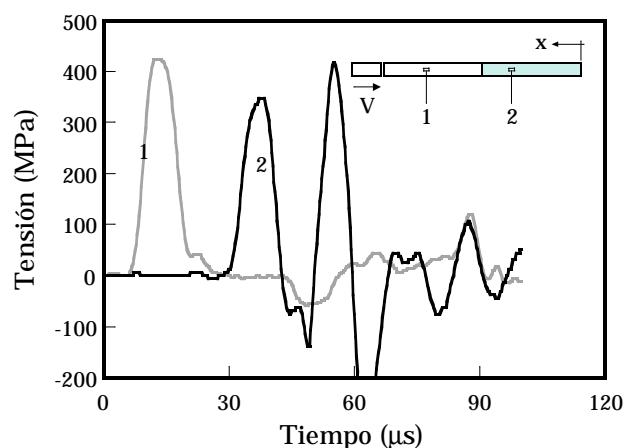
SPAZR02B



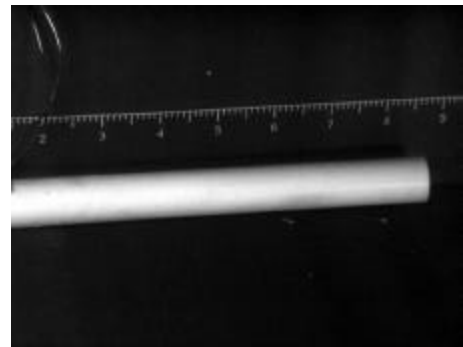
SPAZR02C



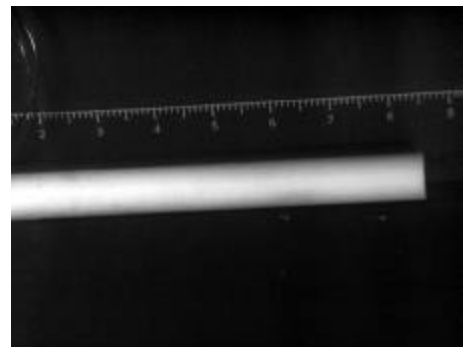
SPAZR02D



| CÓDIGO DE ENSAYO: SPAZR04 | |
|--|-----------------------------------|
| MATERIAL: ALÚMINA CON ZIRCONIA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 349.5 GPa |
| Densidad: | 4025 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | - MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 22 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 2 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 300 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 2 V, ganancia 2100 . Situada a 74.3 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPAZR04A: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPAZR04B: Exposición 2 μ s, retraso 55 μ s. | |
| SPAZR04C: Exposición 2 μ s, retraso 75 μ s. | |
| SPAZR04D: Exposición 2 μ s, retraso 250 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 36 mm |
| Resistencia a tracción: | 301 MPa |
| Velocidad de deformación: | $\approx 800\text{s}^{-1}$ |



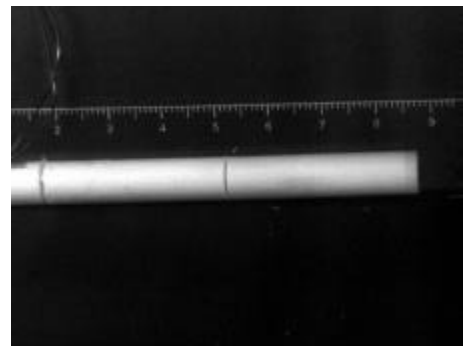
SPAZR04A



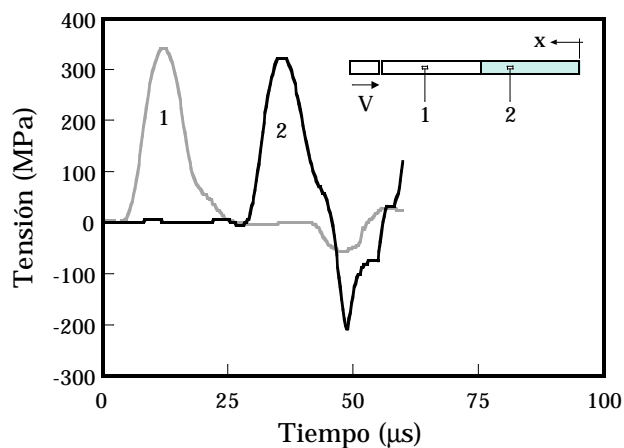
SPAZR04B



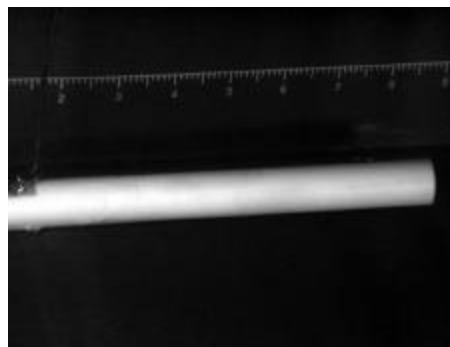
SPAZR04C



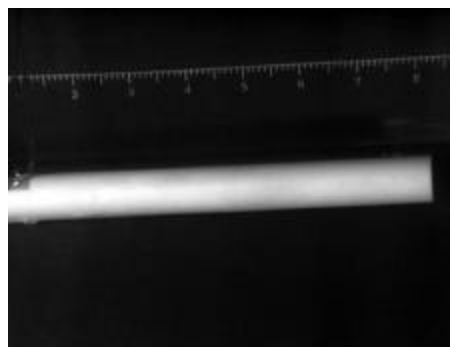
SPAZR04D



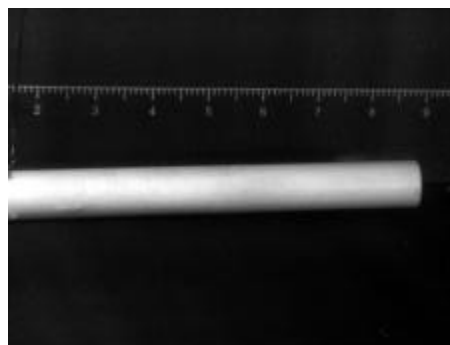
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPAZR05 | |
|--|-----------------------------------|
| MATERIAL: ALÚMINA CON ZIRCONIA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 347.4 GPa |
| Densidad: | 4025 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | - MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 22 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 2 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 300 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 2 V, ganancia 2100 . Situada a 71.0 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPAZR05A: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPAZR05B: Exposición 2 μ s, retraso 55 μ s. | |
| SPAZR05C: Exposición 2 μ s, retraso 75 μ s. | |
| SPAZR05D: Exposición 2 μ s, retraso 250 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 36 mm |
| Resistencia a tracción: | 325 MPa |
| Velocidad de deformación: | $\approx 800 \text{ s}^{-1}$ |



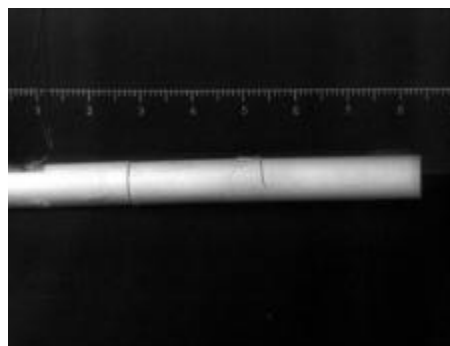
SPAZR05A



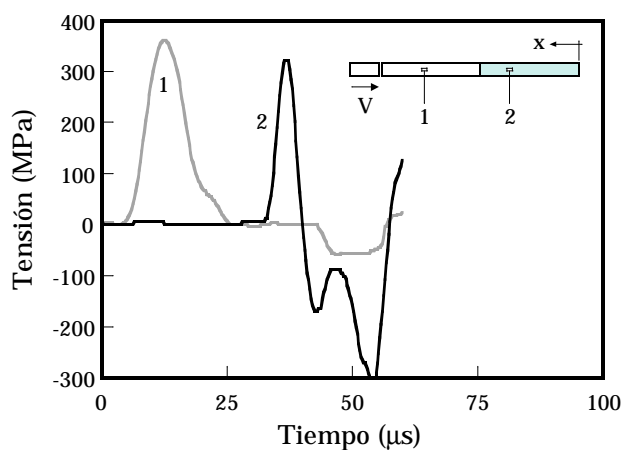
SPAZR05B



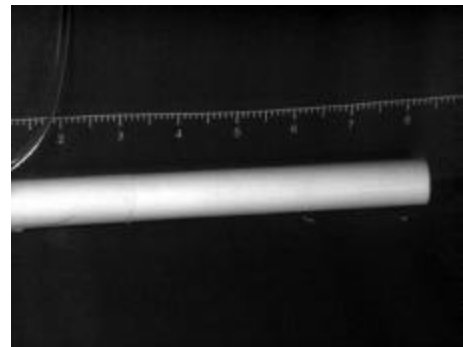
SPAZR05C



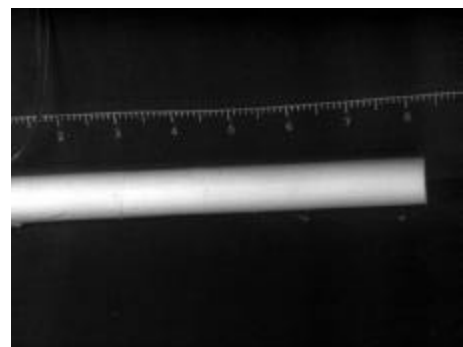
SPAZR05D



| CÓDIGO DE ENSAYO: SPAZR06 | |
|--|-----------------------------------|
| MATERIAL: ALÚMINA CON ZIRCONIA | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 347.0 GPa |
| Densidad: | 4027 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | - MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.99 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 22 mm. | |
| FECHA DE ENSAYO: 2 de Marzo de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 300 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 2 V, ganancia 2100 . Situada a 74.6 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPAZR06A: Exposición 2 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPAZR06B: Exposición 2 μ s, retraso 60 μ s. | |
| SPAZR06C: Exposición 2 μ s, retraso 80 μ s. | |
| SPAZR06D: Exposición 2 μ s, retraso 250 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 37 mm |
| Resistencia a tracción: | 275 MPa |
| Velocidad de deformación: | $\approx 800\text{s}^{-1}$ |



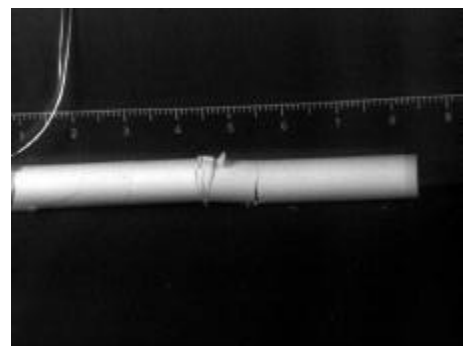
SPAZR06A



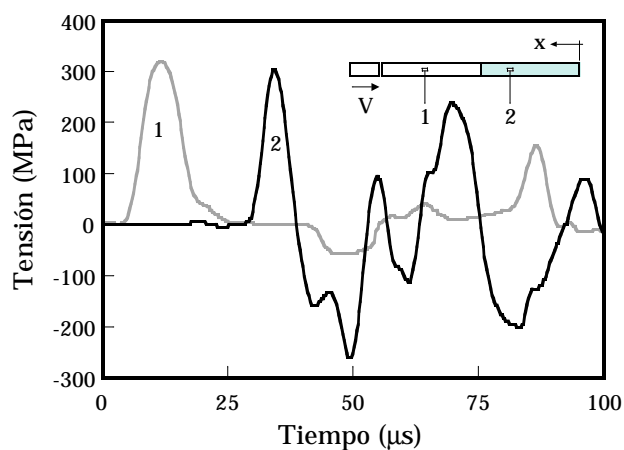
SPAZR06B



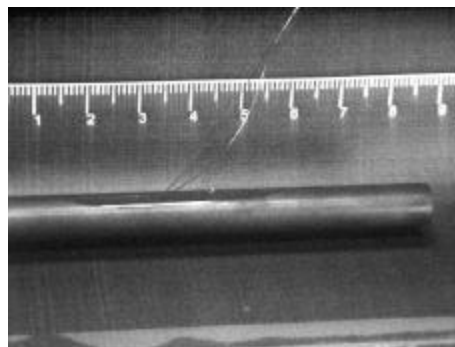
SPAZR06C



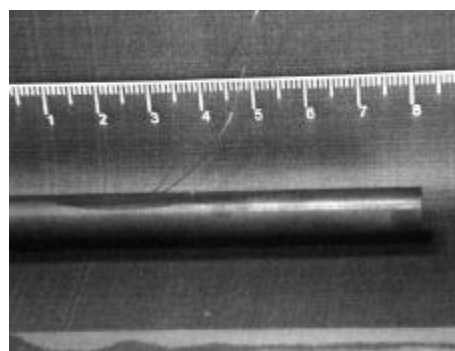
SPAZR06D



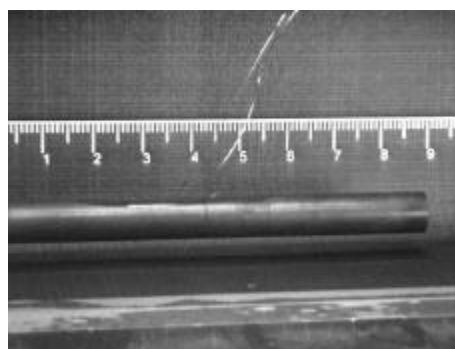
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPSIC05 | |
|--|-----------------------------------|
| MATERIAL: CARBURO DE SILICIO | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 416.7 GPa |
| Densidad: | 3125 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 307 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 462 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.98 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectil 20 mm modificado. | |
| FECHA DE ENSAYO: 3 de Agosto de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 400 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 3 V, ganancia 1200 . Situada a $x \approx 65$ mm del extremo libre | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPSIC05A: Exposición 1 μ s, retraso 35 μ s. SPSIC05B: Exposición 1 μ s, retraso 40 μ s. SPSIC05C: Exposición 1 μ s, retraso 50 μ s. SPSIC05D: Exposición 1 μ s, retraso 150 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 46 mm |
| Resistencia a tracción: | 288 MPa |
| Velocidad de deformación: | 419 s⁻¹ |



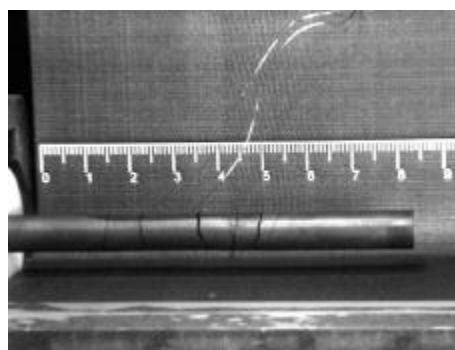
SPSIC05A



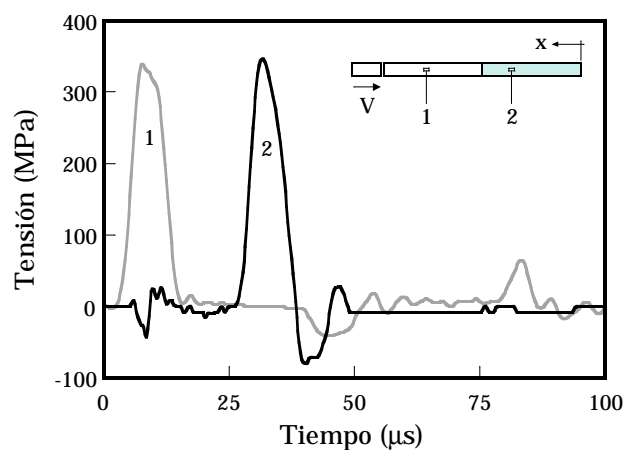
SPSIC05B



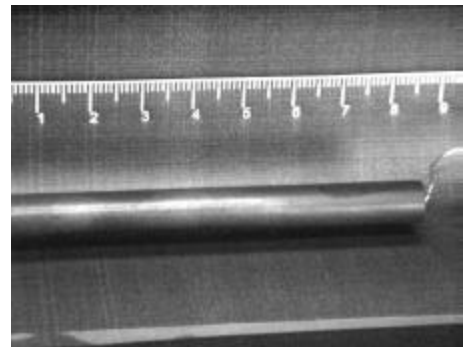
SPSIC05C



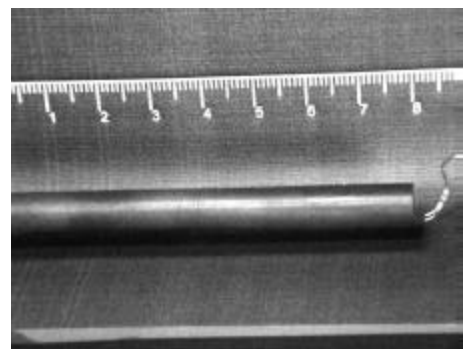
SPSIC05D



| CÓDIGO DE ENSAYO: SPSIC06 | |
|---|-----------------------------------|
| MATERIAL: CARBURO DE SILICIO | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 421.8 GPa |
| Densidad: | 3138 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 307 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 462 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.98 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectil 20 mm modificado. | |
| FECHA DE ENSAYO: 3 de Agosto de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 400 y 1 V/div. Canales 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 3 V, ganancia 3000 . Situada a x=65 mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPSIC06A: Exposición 1 µs, retraso 40 µs. SPSIC06B: Exposición 1 µs, retraso 50 µs. SPSIC06C: Exposición 1 µs, retraso 150 µs. SPSIC06D: Exposición 1 µs, retraso 300 µs. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 44.5 mm |
| Resistencia a tracción: | 249 MPa |
| Velocidad de deformación: | 252 s⁻¹ |



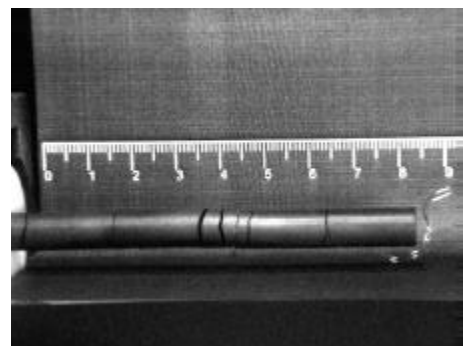
SPSIC06A



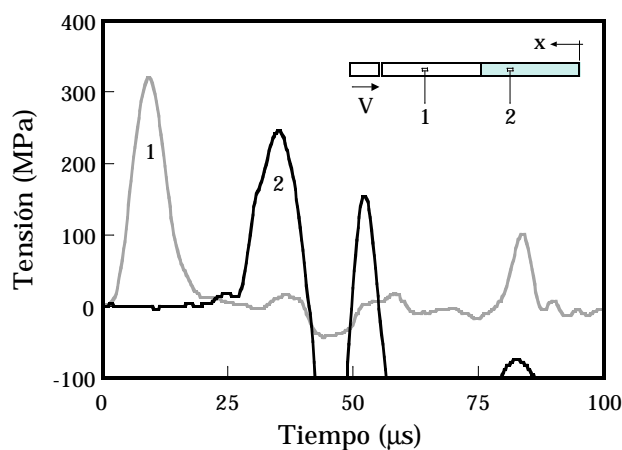
SPSIC06B



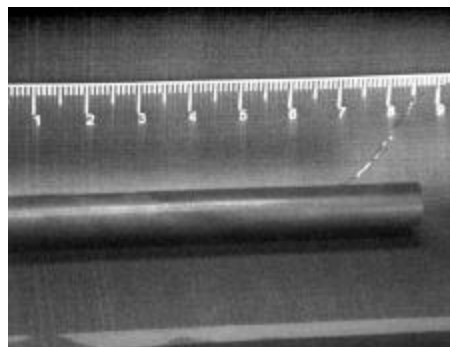
SPSIC06C



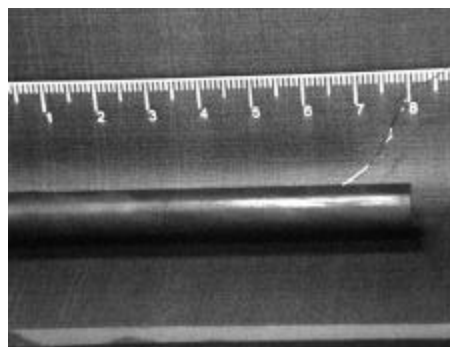
SPSIC06D



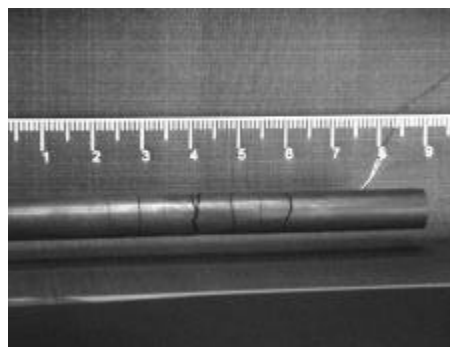
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPSIC07 | |
|--|-----------------------------------|
| MATERIAL: CARBURO DE SILICIO | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 420.0 GPa |
| Densidad: | 3132 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | 307 MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 462 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 7.98 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectil 20 mm modificado. | |
| FECHA DE ENSAYO: 3 de Agosto de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 400 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en $\frac{1}{4}$ puente alimentado a 3 V, ganancia 3000 . Situada a $x \approx 65$ mm del extremo libre. | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPSIC07A: Exposición 1 μ s, retraso 40 μ s. | |
| SPSIC07B: Exposición 1 μ s, retraso 50 μ s. | |
| SPSIC07C: Exposición 1 μ s, retraso 150 μ s. | |
| SPSIC07D: Exposición 1 μ s, retraso 300 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 46 mm |
| Resistencia a tracción: | 330 MPa |
| Velocidad de deformación: | 424 s⁻¹ |



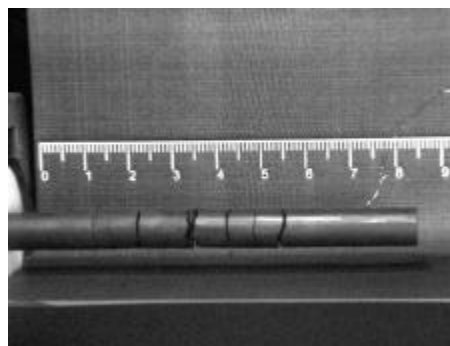
SPSIC07A



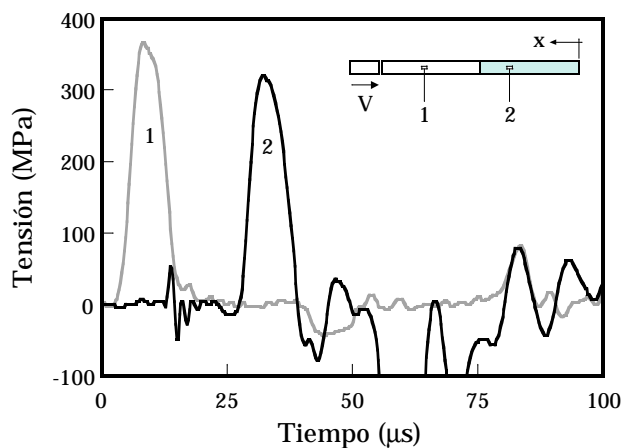
SPSIC07B



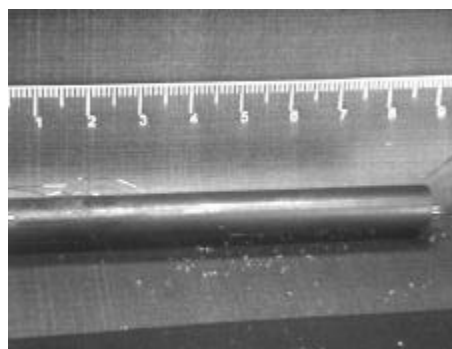
SPSIC07C



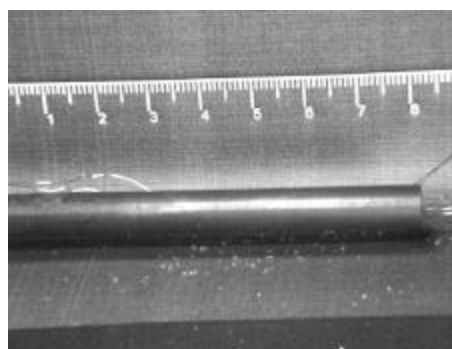
SPSIC07D



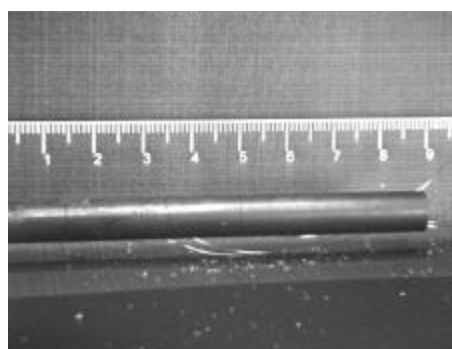
| | |
|--|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPB4C06 | |
| MATERIAL: CARBURO DE BORO | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 460.8 GPa |
| Densidad: | 2513 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 350 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.00 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 20 mm modificado. | |
| FECHA DE ENSAYO: 4 de Agosto de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 400 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 4 V, ganancia 3000 . Situada a x=65 mm del extremo libre. | |
| Canal 3: Mismas características, x=69 mm | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPB4C06A: Exposición 1 µs, retraso 40 µs. | |
| SPB4C06B: Exposición 1 µs, retraso 50 µs. | |
| SPB4C06C: Exposición 1 µs, retraso 60 µs. | |
| SPB4C06D: Exposición 1 µs, retraso 400 µs. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 52.5 mm |
| Resistencia a tracción: | 280 MPa |
| Velocidad de deformación: | 443 s⁻¹ |



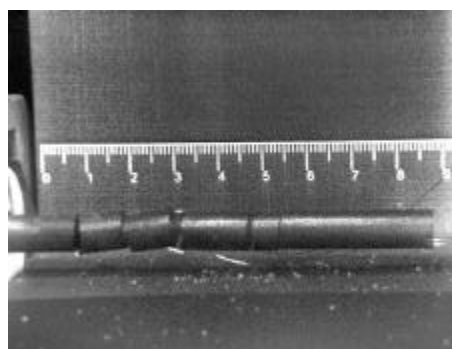
SPB4C06A



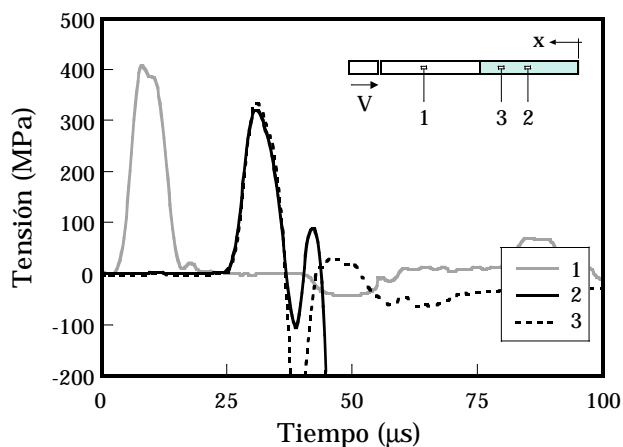
SPB4C06B



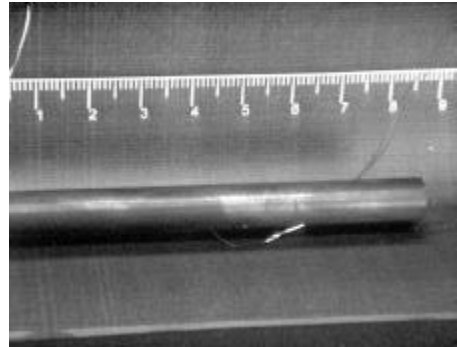
SPB4C06C



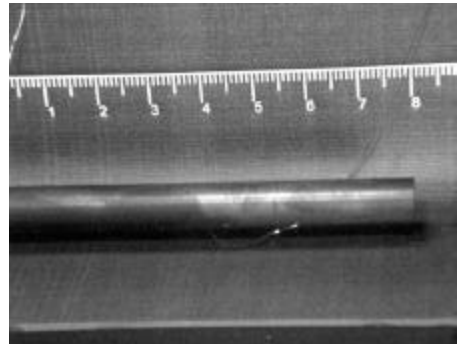
SPB4C06D



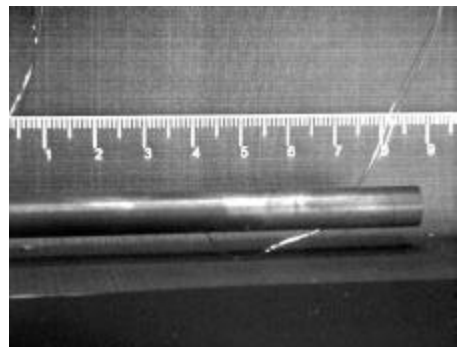
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPB4C07 | |
|--|-----------------------------------|
| MATERIAL: CARBURO DE BORO | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 459.5 GPa |
| Densidad: | 2508 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 350 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.00 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 20 mm modificado. | |
| FECHA DE ENSAYO: 4 de Agosto de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 400 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 3 V, ganancia 3000 . Situada a x=63.5 mm del extremo libre. | |
| Canal 3: Mismas características, x=68 mm | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPB4C07A: Exposición 1 µs, retraso 40 µs. | |
| SPB4C07B: Exposición 1 µs, retraso 50 µs. | |
| SPB4C07C: Exposición 1 µs, retraso 60 µs. | |
| SPB4C07D: Exposición 1 µs, retraso 300 µs. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 51.5 mm |
| Resistencia a tracción: | 258 MPa |
| Velocidad de deformación: | 254 s⁻¹ |



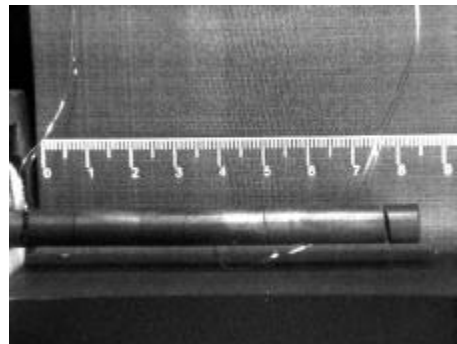
SPB4C07A



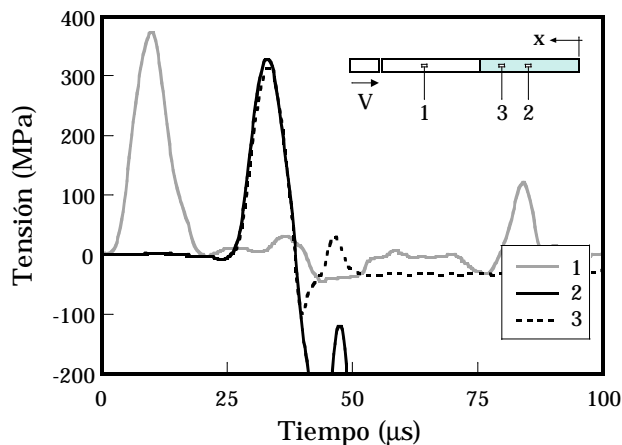
SPB4C07B



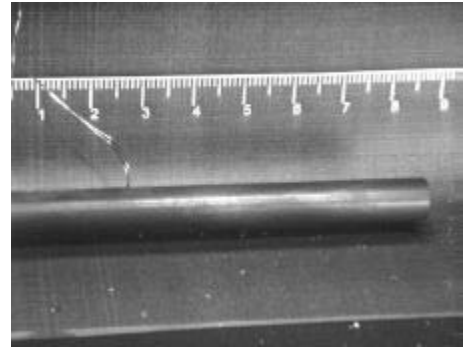
SPB4C07C



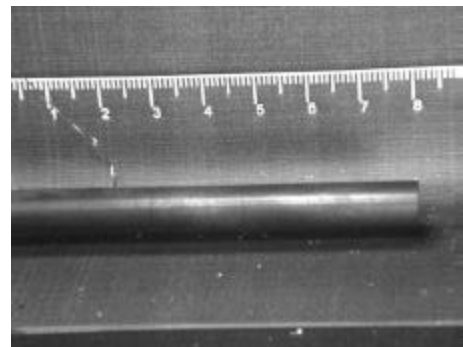
SPB4C07D



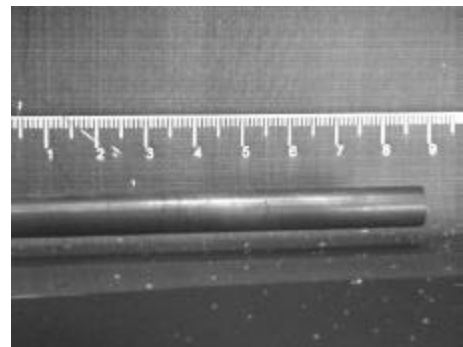
| | |
|--|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPB4C08 | |
| MATERIAL: CARBURO DE BORO | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 461.0 GPa |
| Densidad: | 2512 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 350 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.00 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 20 mm modificado. | |
| FECHA DE ENSAYO: 4 de Agosto de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 400 y 1 V/div. | |
| Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 3 V, ganancia 3000 . Situada a x=67 mm del extremo libre. | |
| Canal 3: Mismas características, x=72 mm | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. | |
| SPB4C08A: Exposición 1 µs, retraso 40 µs. | |
| SPB4C08B: Exposición 1 µs, retraso 50 µs. | |
| SPB4C08C: Exposición 1 µs, retraso 60 µs. | |
| SPB4C08D: Exposición 1 µs, retraso 300 µs. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 52.5 mm |
| Resistencia a tracción: | 290 MPa |
| Velocidad de deformación: | 399 s⁻¹ |



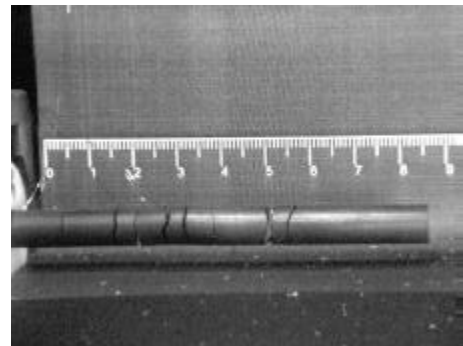
SPB4C08A



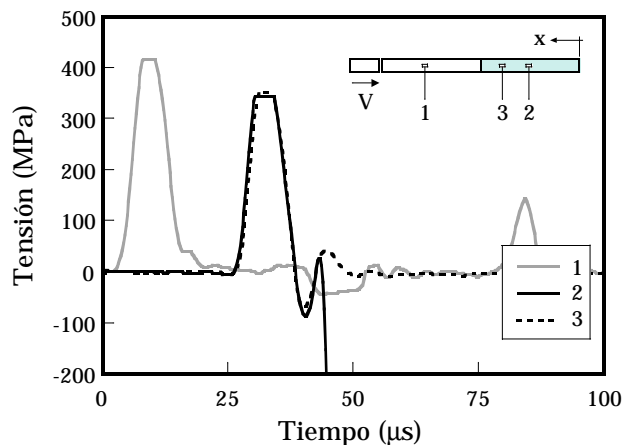
SPB4C08B



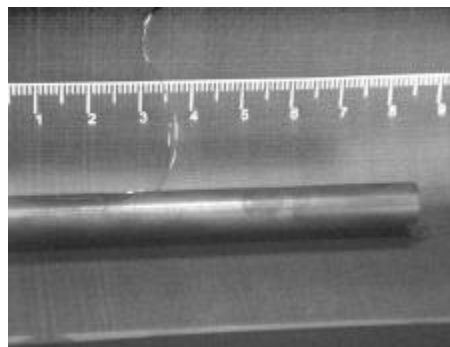
SPB4C08C



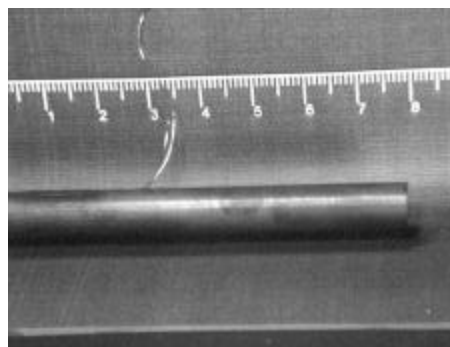
SPB4C08D



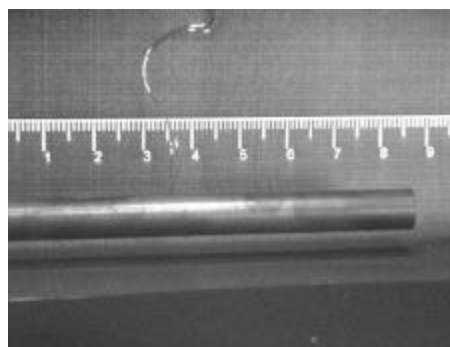
| | |
|--|-----------------------------------|
| CÓDIGO DE ENSAYO: SPB4C09 | |
| MATERIAL: CARBURO DE BORO | |
| PROPIEDADES MECÁNICAS | ¹ Datos del fabricante |
| Módulo de elasticidad: | 460.3 GPa |
| Densidad: | 2511 kg/m³ |
| Resistencia a tracción ¹ : | - MPa |
| Módulo de rotura ¹ : | 350 MPa |
| PROPIEDADES GEOMÉTRICAS | |
| Probeta cilíndrica. | |
| Diámetro: | 8.00 mm |
| Longitud: | 100 mm |
| MÁQUINA DE ENSAYOS: | |
| Barra de Spalling. Proyectoil 20 mm modificado. | |
| FECHA DE ENSAYO: 4 de Agosto de 1999 | |
| REGISTRO DE DATOS | |
| Canal 1: Barra incidente, ganancia 400 y 1 V/div. Canal 2: Banda extensométrica modelo CEA06-032UW-120 de factor de galga 2.09 montada en ¼ puente alimentado a 3 V, ganancia 3000 . Situada a x=64 mm del extremo libre. Canal 3: Mismas características, x=68 mm | |
| FOTOGRAFÍAS | |
| Señal de disparo: Registro del Canal 1. SPB4C09A: Exposición 1 μ s, retraso 40 μ s. SPB4C09B: Exposición 1 μ s, retraso 50 μ s. SPB4C09C: Exposición 1 μ s, retraso 60 μ s. SPB4C09D: Exposición 1 μ s, retraso 300 μ s. | |
| RESULTADOS | |
| Rotura inicial: | 55.5 mm |
| Resistencia a tracción: | 295 MPa |
| Velocidad de deformación: | 384 s⁻¹ |



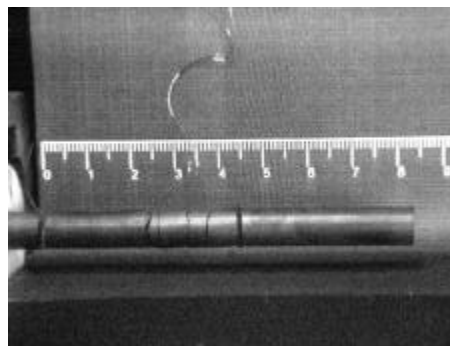
SPB4C09A



SPB4C09B



SPB4C09C



SPB4C09D

